



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

OpenFOAM을 이용한 불규칙파 중 선체 운동해석에 관한 연구

A study on ship motions in irregular waves
using OpenFOAM



2019년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

문 성 호

본 논문을 문성호의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 이 승 재 (인)

위 원 조 효 제 (인)

위 원 이 성 욱 (인)

2019년 02월 20일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	v

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용	3

2. 2차원 수치 파 생성

2.1 지배방정식 및 격자계	4
2.2 Euler Overlay Method	7
2.3 파라메트릭 연구	9
2.2.1 반사계수	9
2.2.2 파라메트릭 연구 절차	11
2.2.3 파라메트릭 연구 결과	14

3. 불규칙파 중 선체 운동응답

3.1 불규칙파 구현	25
3.2 선체 운동해석	33
3.2.1 격자계 및 해석조건	33
3.2.2 운동해석 결과	37
3.2.3 결과 검증	44

4. 결론

참고문헌	50
------------	----



List of Tables

Table 1 Test case parameters	11
Table 2 Principal particulars of KCS (MOERI)	28
Table 3 Variances(m_0) of wave spectrums	32



List of Figures

Fig. 1 2D grid system	6
Fig. 2 Contour plot of overlay parameter, $\mu(x,y)$	8
Fig. 3 Wave elevation over x-location	10
Fig. 4 Captured wave elevation over x-location	11
Fig. 5 Parametric study procedure	12
Fig. 6 C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} ($\lambda=6.24\text{m}$)	14
Fig. 7 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different μ_{\max} value conditions ($\lambda=6.24\text{m}$, wave steepness = $1/20$)	16
Fig. 8 Comparison of C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} in different wave steepness conditions	17
Fig. 9 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different μ_{\max} value conditions ($\lambda=6.24\text{m}$, wave steepness = $1/15$)	19
Fig. 10 C_R (reflection coefficient) over EOM zone size ($\lambda=6.24\text{m}$)	20
Fig. 11 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different EOM zone size conditions ($\lambda=6.24\text{m}$, wave steepness = $1/20$)	22
Fig. 12 Comparison of C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} in different wave length conditions	23
Fig. 13 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period ($\lambda=12.64\text{m}$)	24
Fig. 14 Guidelines for eomFoam set-up	24

Fig. 15	White noise spectrum	26
Fig. 16	2D computational domain	27
Fig. 17	Mesh configuration around free surface	27
Fig. 18	Hull form of KCS	28
Fig. 19	Comparison of time histories of input wave and CFD wave	31
Fig. 20	Comparison of wave spectrums	32
Fig. 21	3D computational domain	34
Fig. 22	Prism layer mesher	34
Fig. 23	Surface mesh refinement	35
Fig. 24	Mesh morphing method	36
Fig. 25	Time series of heave motion	38
Fig. 26	Time series of pitch motion	40
Fig. 27	Response spectrum of heave motion	40
Fig. 28	Response spectrum of pitch motion	41
Fig. 29	RAO for heave motion with input and response spectrum	43
Fig. 30	RAO for pitch motion with input and response spectrum	43

A study on ship motions in irregular waves using OpenFOAM

Moon, Seong Ho

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The main purpose of this study is to validate the accuracy and applicability of CFD in seakeeping analysis. A solver called ‘eomFoam’ is developed by implementing the EOM(Euler Overlay Method) in OpenFOAM for elimination of wave reflection. In order to optimize the intensity of reflection wave damping, a parametric study is carried out for setting the appropriate damping intensity and damping zone size according to incident wave characteristics(wave steepness, wave length). Furthermore, the irregular wave based on the whitenoise spectrum is simulated using the eomFoam, and the RAOs of ship motions(heave and pitch) is calculated through the response spectrum of each motions in irregular waves.

KEY WORDS: OpenFOAM 오픈폼; Ship motion 선박운동; Irregular waves 불규칙파; Wave reflection 파 반사; Euler Overlay Method;

OpenFOAM을 이용한 불규칙파 중 선체 운동해석에 관한 연구

Moon, Seong Ho

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

본 연구는 선박의 내항성 문제에 있어, CFD의 정확도 및 활용 가능성을 검토하기 위한 기초 연구이다. 오픈소스 CFD프로그램인 OpenFOAM에 반사와 감쇠방식인 EOM방식을 구현하여 eomFoam이라는 솔버를 개발하고, 반사와 감쇠강도 최적화를 위해 입사파 특성(파 기울기, 파 길이)에 따른 적정 강도 및 감쇠 구간 크기에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 나아가 eomFoam을 활용하여 whitenoise spectrum 기반의 불규칙파를 구현하고, 불규칙파 중 선체의 상하동요(Heave) 및 종동요(Pitch) 운동 응답 스펙트럼을 계산하여 최종적으로 각 운동에 대한 RAO를 도출하였다. 더불어 특정 주파수의 규칙파 조건에서 구한 운동 RAO를 통해 앞선 불규칙파 조건과 비교하고 검증하였다.

KEY WORDS: OpenFOAM 오픈폼; Ship motion 선박운동; Irregular waves 불규칙파; Wave reflection 파 반사; Euler Overlay Method;

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

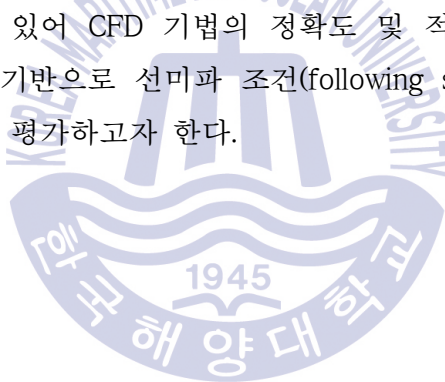
선박의 내항성(sea keeping ability)을 평가함에 있어 선체운동 및 파랑 하중에 대한 해석은 모형실험과 더불어 Strip method, Panel method 등의 포텐셜 이론 기반의 수치해석적 방법을 통해 활발히 수행되어왔다. 그러나 최근에는 대파고 및 대진폭 운동 시의 비선형 효과가 내항성능평가에 중요한 요소로 대두되면서 CFD(Computer Fluid Dynamics)를 이용한 선박의 운동성능해석 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Park et al., 2013; Chen & Yu, 2009). 그러나 대진폭 운동 시의 격자변형 기법이나 격자에 의한 수치확산 등의 한계를 가지면서, 운동성능평가를 위한 CFD의 활용은 그 정확도를 세밀하게 검토해야할 단계에 있다.

더불어 CFD를 통한 운동성능 해석에 있어 도메인 내의 정확한 파랑 모사는 최종 해석값에 영향을 줄 수 있는 인자로써, 선박의 운동응답을 평가하기 전 면밀한 사전 검토가 필요하다. 파랑 모사에 영향을 줄 수 있는 요인으로서는 자유수면을 구성하는 격자계, 도메인 경계에서 발생하는 반사파 등이 있고 이러한 인자들의 영향도는 수치해석 솔버의 특성에 따라 달라진다. 격자계의 경우 통상적으로 해석 수행 전 격자 수렴도 테스트(grid convergence test)를 통해 파고의 변화를 계측하고, 격자 수에 따른 계산 시간 등의 효율성을 따져 구성한다. 반면, 반사파 감쇠 방식에는 grid damping (Kraskowski, 2010), solution-coupling (Kim, 2013) 방식 등 다양한 기법이 존재하고 이에 관한 연구도 활발히 진행 중이다.

solution-coupling 방식 중의 하나인 EOM(Euler Overlay Method)방식은 파 생성 및 감쇠 구간을 설정하고, 영역 내에서 포텐셜 기반의 해와 CFD를 통한 계

산된 해의 차에 가중치를 주어 모멘텀 보존 방정식 및 VOF 이송방정식의 소스 항에 추가하는 방식이다. 특히 EOM 방식의 경우 반사파 감쇠 강도의 최댓값을 설정할 수 있으므로 반사파 발생 시 이 최댓값을 조절하여 감쇠효율을 최적화할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 EOM방식에 있어 적절한 감쇠 강도 설정에 관한 연구는 미흡한 실정이며 EOM방식이 구현된 대부분의 연구들 경우 AcuSolve (Kim, et al., 2011), StarCCM+ (Bockmann et al., 2014; Kim et al., 2012) 등의 상용 CFD 소프트웨어를 통해 수행되었다.

따라서 본 연구는 CFD 도메인내의 정확한 파랑모사를 위해 반사파 감쇠 기법 중 하나인 EOM(Euler Overlay Method) 방식을 OpenFOAM에 적용하여 eomFoam이라는 솔버를 개발하고, 적절한 감쇠 강도에 설정 및 감쇠 영역 크기 선정을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다. 나아가 eomFoam을 활용하여, 선박의 운동성능 해석에 있어 CFD 기법의 정확도 및 적용가능성을 검토하고자 white noise 스펙트럼 기반으로 선미파 조건(following sea)에서 선박의 운동 응답(상하동요, 종동요)을 평가하고자 한다.



1.2 연구내용

본 연구에서는 오픈소스 CFD프로그램인 OpenFOAM에 반사파 감쇠방식인 EOM방식을 구현하여 eomFoam이라는 솔버를 개발하고, 반사파 감쇠강도 최적화를 위해 입사파 특성(파 기울기, 파 길이)에 따른 적정 강도 및 감쇠 구간 크기에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 나아가 whitenoise spectrum 기반의 불규칙파를 구현하고 이를 활용하여 불규칙 파 중 선체의 상하동요(Heave) 및 종동요(Pitch) 운동 RAO를 도출하였다. 또한, 특정 주파수의 규칙파에 대한 운동 RAO를 구하여 불규칙파 조건과 비교하고 검증하였다.



제 2 장 2차원 수치 파 생성

2.1 지배방정식 및 격자계

본 연구에서는 파랑을 모사하기 위해 비압축성 유동에 대해 레이놀즈 평균화된 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 기반 수치해석법을 사용하였고 지배방정식으로 질량 및 운동량 보존식은 식(1) 및 (2)와 같다.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (2)$$

여기서, U 는 속도 벡터, p 는 정압을 나타내고 ρ 와 g 는 각각 밀도와 중력 가속도를 의미한다. 또한, τ 는 점성 응력 텐서로써 $2\mu D - 2\mu(\nabla \cdot U)I/3$ 으로 표현되며 여기서, D 와 μ 는 각각 변형률 텐서와 점성계수를 뜻한다.

지배 방정식의 비정상항에 대해서는 2차 정확도의 Crank-Nicolson기법을 사용하여 차분하였고, 대류항과 확산항의 경우 각각 2차 정확도의 linear-upwind 풍상 차분 기법(Gauss linearUpwind)과 선형 차분 기법(Gauss linear)을 적용하였다. 또한, 자유수면 유동 해석 기법으로 유체 체적법(Volume of Fluid, VOF)이 사용되었다. 속도-압력 연성에는 PISO(Issa, 1985)와 SIMPLE(Patankar & Spalding, 1972)을 결합한 PIMPLE 알고리즘이 쓰였고 Inner iteration 및 Outer iteration 횟수는 기존 PISO 알고리즘에 통상적으로 사용되고 해석 오차를 줄이기 위해 각각 2회씩 적용하였다.



2차원 수치 파를 구현하기 위해 전체 격자에 대해 비정렬 hexahedral 격자가 적용되는 HEXPRESS 격자 생성 툴을 사용하여 Fig.1과 같이 직사각형의 형태의 2D 도메인을 구성하였다. 또한, 생성된 파의 격자 크기에 따른 수치적 확산을 방지하기 위해 자유수면 주변에 사전 격자 수렴도 테스트 시 입사파 대비 약 95% 응답을 보였던 파 길이 당 180개, 파고 당 13개의 격자를 적용하였다.

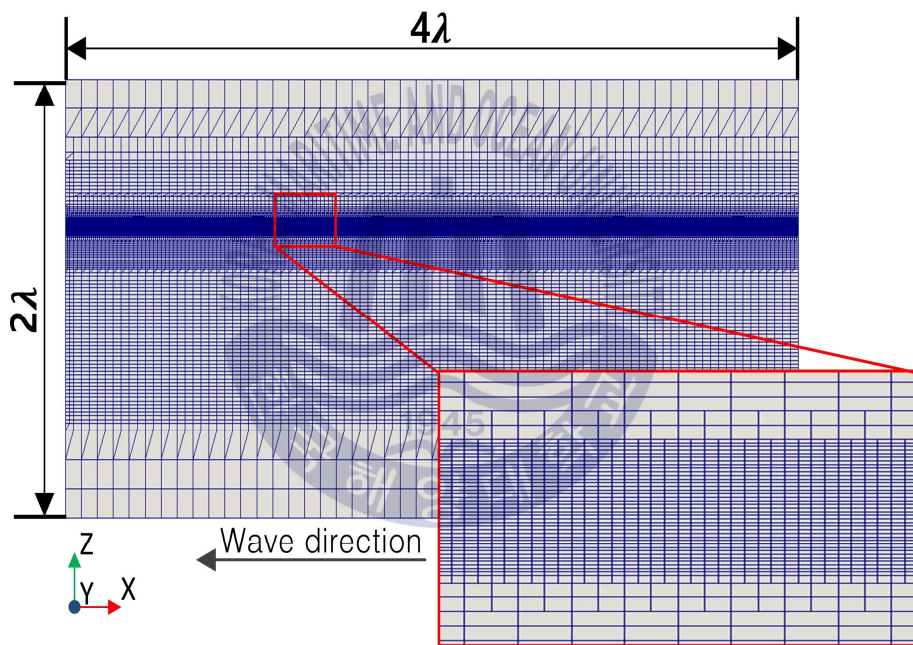


Fig. 1 2D grid system

2.2 Euler Overlay Method

Kim, et al.(2011, 2012)과 Bockmann, et al.(2014)에서 소개된 Euler Overlay Method(EOM)는 속도 및 체적비 이송 방정식의 소스항을 변형시켜 반사파를 감소시키는 방법이며 기존 소스항(S_ϕ)을 아래 식 (3)과 같이 변형한다.

$$S_\phi^* = S_\phi - \rho\mu(x,y)(\Phi - \Phi^*) \quad (3)$$

여기서, ϕ 과 ϕ^* 는 각각 CFD 기반 해와 경계면에서 주어지는 포텐셜 기반 해를 나타낸다. 또한, Overlay parameter라 불리는 $\mu(x,y)$ 는 식 (4) 및 식 (5)와 같이 구성된다.

$$\mu(x,y) = \mu_{\max} \{1 - \mu_0(x)\mu_0(y)\} \quad (4)$$

$$\mu_0(x) = \begin{cases} 1, & x \leq R_{in} \\ \cos^2 \frac{\pi(x - R_{in})}{2(R_{out} - R_{in})}, & R_{in} < x < R_{out} \\ 0, & x \geq R_{out} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 μ_{\max} 는 사용자가 설정한 감쇠 강도의 최댓값을 나타내고, $\mu_0(x)$ 및 $\mu_0(y)$ 는 식 (5)에서 보이는 바와 같이 두해의 차($\phi - \phi^*$)를 공간상에서 Cosine-square 함수 형태로 변화시키는 가중 함수이다. 단, 본 연구는 2D 도메인 기반으로 수행되어 $\mu_0(y)$ (y방향)는 적용되지 않았다. 더불어 기존 ‘wave relaxation zones’ 방식에서는 Exponential 함수나 다항 함수 형태의 가중 함수를 사용하지만 (Jacobsen, et al. (2012)), 본 연구에서는 감쇠 강도의 급격한 변화에 따른 반사파 발생을 방지하기 위해 상대적으로 기울기가 완만한

Cosine-square 형태의 가중 함수를 사용하였다. 식 (5)의 R_{in} 및 R_{out} 은 EOM방식이 적용되는, 즉 반사와 감쇠가 이뤄지는 구간(EOM zone)의 두 경계면을 나타낸다. 따라서 두 경계면 사이에서 속도나 체적비의 차가 Fig.2에서 보이는 바와 같이 0에서부터 사용자가 설정한 μ_{max} 까지 Cosine-square 형태로 가중치에 따라 변화하게 된다.

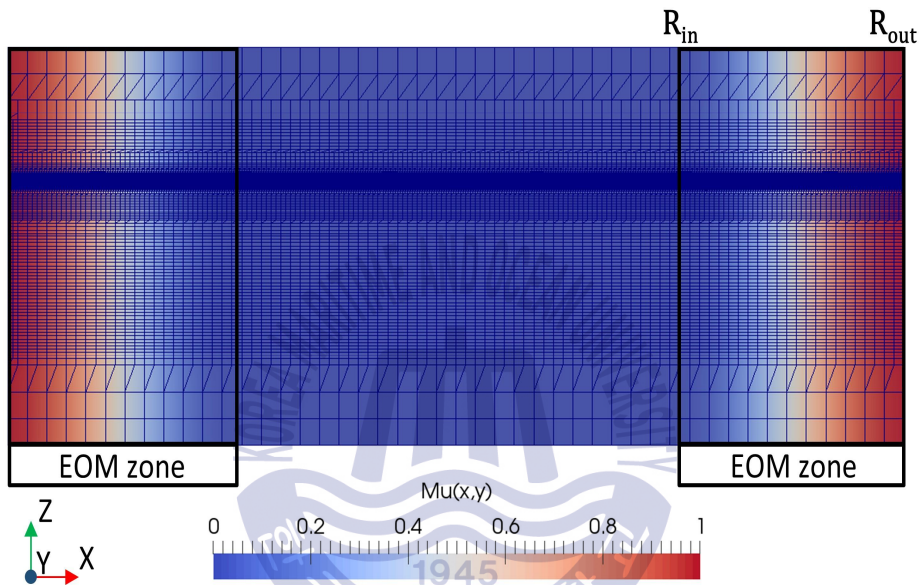


Fig. 2 Contour plot of overlay parameter, $\mu(x,y)$

2.3 파라메트릭 연구

2.3.1 반사 계수

본 연구에서는 파라미터 별 반사파 감쇠 효율을 정량적으로 평가하기 위해 입사파에 대한 반사파의 비를 나타내는 반사 계수(reflection coefficient, C_R)를 사용하였다 (Ursell, et al.(1960)). 실제 CFD 도메인의 경계면에서 반사파가 발생하면 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 입사파와의 중첩(superposition)으로 인해 일정 시간이 지나면, 초기 설계한 파랑이 포락선(wave envelope)을 가지는 파속(wave packet)을 형성하여 부분적인 정상파(partial standing wave)의 형태를 띄게 된다 (Peric, et al., 2016). 반사파가 많이 발생할수록 정상파의 형태에 가까워지는데 이러한 현상을 이용해서 반사계수를 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$C_R = (H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min}) \quad (6)$$

여기서 H_{\max} 및 H_{\min} 은 Fig.3에서 보이는 바와 같이 각각 중첩으로 인해 생긴 포락선(wave envelope)의 최대 파고와 최소 파고를 의미한다.

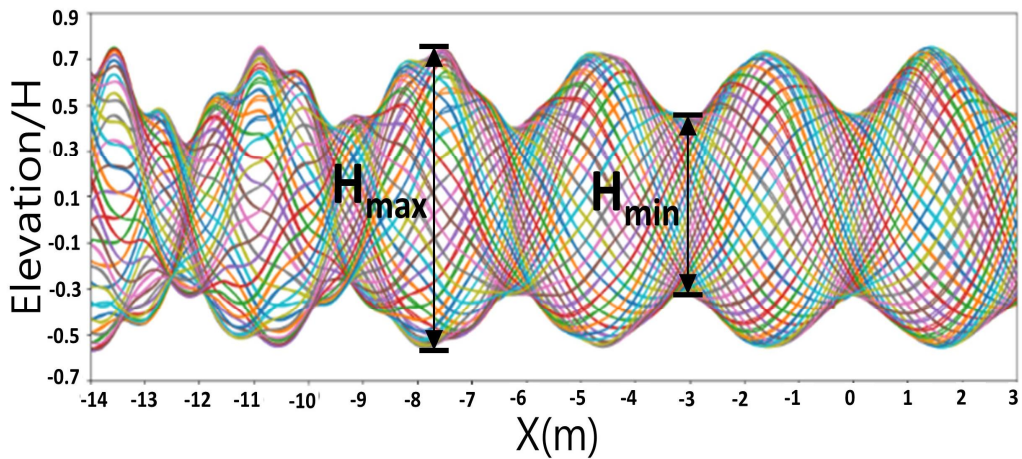


Fig. 3 Wave elevation over x-location

최대 및 최소 파고를 구하기 위한 방법은 다음과 같다. 먼저, Euler Overlay Method가 적용되는 구역(Fig.4 참조)을 제외한 영역(2λ)에 약 500개의 Probe를 설치하여 파 높낮이를 측정한다. 이 때 Fig.4에서 보이는 바와 같이 파의 한 주기를 40개의 시간간격으로 나눠 총 2주기(T)동안 각각의 시간에서의 파고의 평균을 구한다. 이렇게 구한 평균값들 중에서 최댓값과 최솟값을 통해 최종적으로 식 (7)과 같이 반사계수(C_R)를 최종적으로 구할 수 있다.

$$C_R = (\bar{H}_{\max} - \bar{H}_{\min}) / (\bar{H}_{\max} + \bar{H}_{\min}) \quad (7)$$

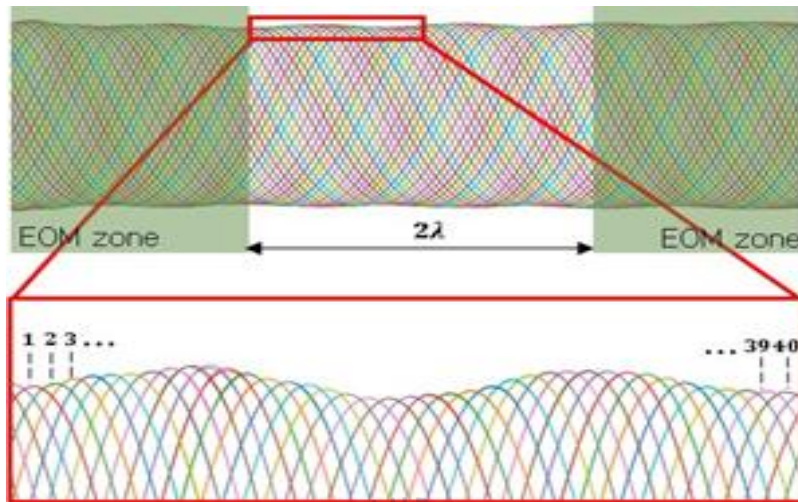


Fig. 4 Captured wave elevation over x-location

2.3.2 파라메트릭 연구 절차

파라메트릭 연구에 사용된 총 파라메터를 Table 1에 나타내었다. 또한, 최적의 감쇠 효율을 구하기 위한 파라메트릭 연구 절차는 Fig.5와 같다.

Table 1 Test case parameters

Parameter	Magnitude
$\mu_{\max}[1/s]$	[0.1,40]
Wave steepness[H/λ]	1/20, 1/15
EOM zone size[λ]	0 / 0.25 / 0.5 / 0.75 / 1.0 / 1.25
Wave length[m]	12.48 / 6.24 / 3.12

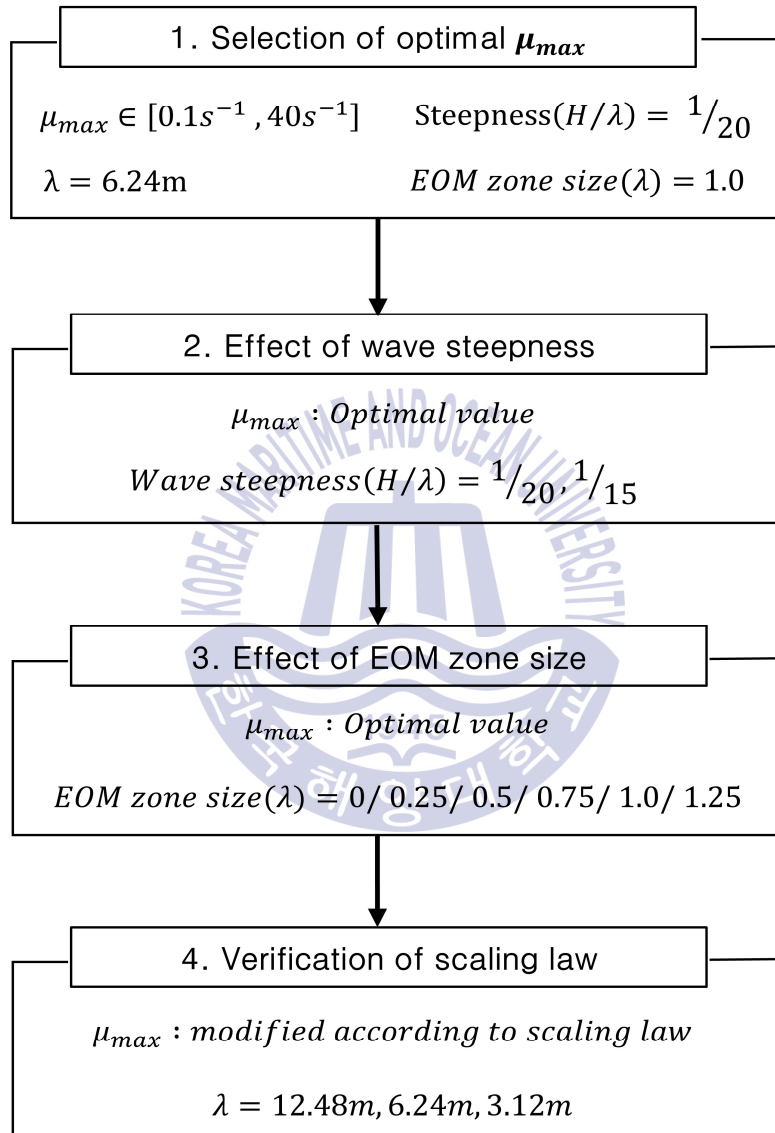


Fig. 5 Parametric study procedure

먼저 μ_{\max} 를 $0.1s^{-1}$ 부터 $40s^{-1}$ 까지 총 18개를 선정하고 각각의 μ_{\max} 에 따른 반사계수를 구하여 감쇠 효율을 비교한다. 이때 초기 입사파는 TechnipFMC에서 제공하는 라이브러리를 통해 Stokes 파($\lambda=6.24m$)에 대한 수치 해석적 해를 적용하였다 (Kim, et al., 2011). 두 번째로, 앞선 단계에서 선정한 최적의 μ_{\max} , 즉 반사계수가 가장 낮은 μ_{\max} 를 기반으로 초기 유입되는 파고의 크기만 변화시켜서 파 기울기에 따른 반사 계수를 비교한다. 이때 파장 및 파고 당 격자수는 앞선 단계와 동일하게 구성한다. 다음으로, 감쇠구간을 0λ 부터 1.25λ 까지 변화시켜 그에 따른 반사계수를 통해 EOM이 적용되는 구간의 크기에 따른 감쇠효율을 파악한다. 마지막으로 $[1/s]$ 의 차원을 가지는 μ_{\max} 가 초기 설계한 파랑의 파 주파수 $\omega[rad/s]$ 와 비례한다는 점을 고려해 다른 주파수의 파에 대해 아래 식 (8)과 같이 스케일 법칙을 통해 적용시켰을 때의 유효성을 검토하였다.

$$\mu_{\max} = \mu_{\max}^* \cdot \omega / \omega^* \quad (8)$$

* : Reference case

여기서 μ_{\max}^* 와 ω^* 는 각각 파라메트릭 연구 첫 번째 단계에서 구한 최적의 μ_{\max} 및 초기 설정한 파 주파수를 의미한다.

2.3.3 파라메트릭 연구 결과

파라메트릭 연구 첫번째 절차로서 μ_{\max} 에 따른 반사 계수의 결과는 Fig. 6와 같다. $[0.3s^{-1} \leq \mu_{\max} \leq 1.5s^{-1}]$ 구간(음영 부분)에서 반사계수 즉, 입사파에 대한 반사파의 비율이 1%이하의 값을 가지면서 반사파 감쇠효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 다음 단계에서 사용될 최적의 μ_{\max} 값은 이 구간에서 반사계수 값이 가장 작은 $0.5s^{-1}$ 로 선정하였다. 3.1절에서 설명한 시간간격에 따른 파 높낮이 변화를 공간상에 나타낸 결과 또한 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 알 수 있듯이 반사계수가 상대적으로 낮은(1%이하) $\mu_{\max}=0.5s^{-1}$, $10s^{-1}$ 에서 초기 설계한 파랑의 일관성이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

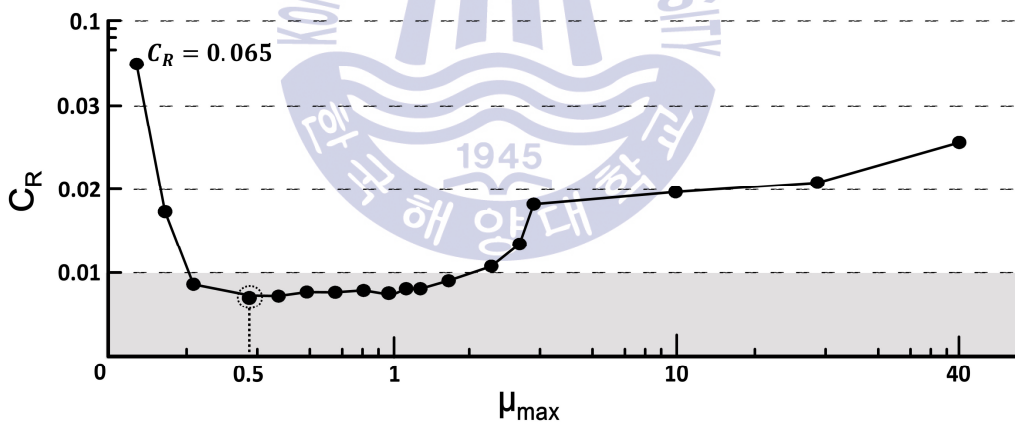
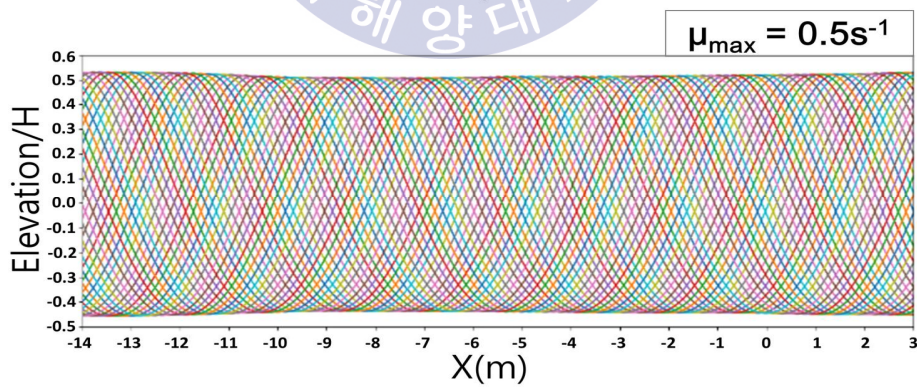
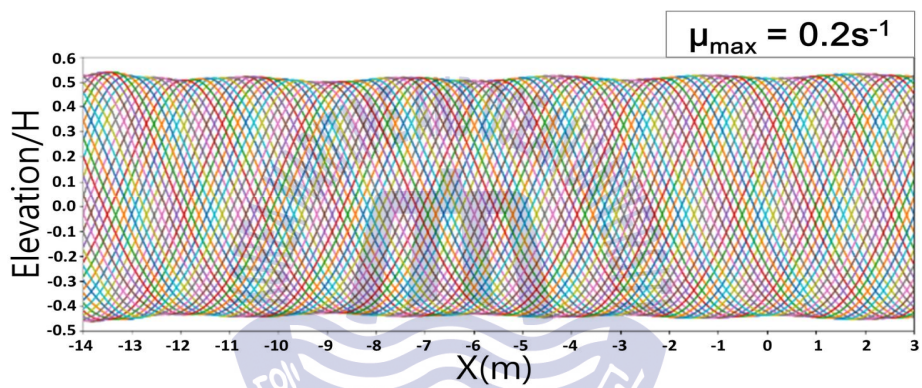
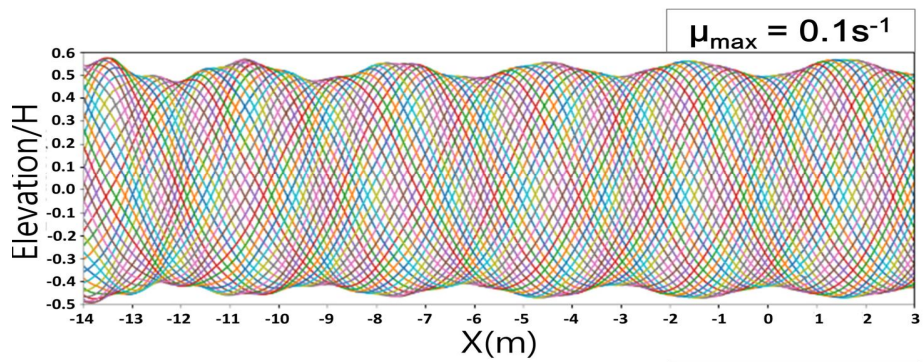


Fig. 6 C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} ($\lambda = 6.24m$)



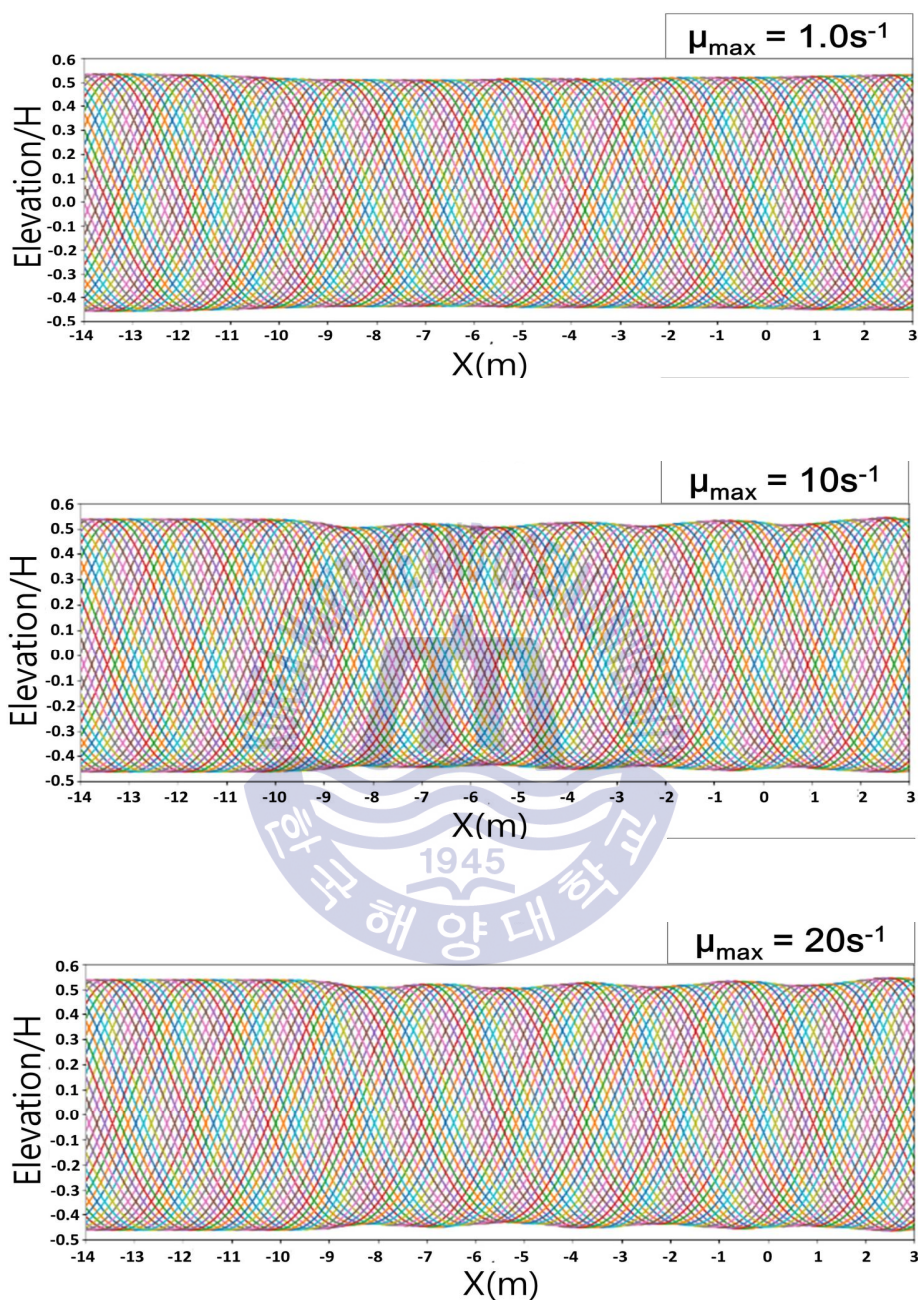


Fig. 7 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different μ_{\max} value conditions ($\lambda = 6.24\text{m}$, wave steepness = $1/20$)

Fig.8은 파 기울기의 변화에 따른 영향도를 파악하기 위해 수행한 두 번째 파라메트릭 연구 절차의 결과를 나타내고 있다. 파 기울기 1/15에 대한 반사계수는 파 기울기 1/20의 결과와 전반적으로 비슷한 경향을 보였고, 반면 $[0.2s^{-1} \leq \mu_{\max}]$ 구간에 대해서 반사 계수는 파 기울기 1/20의 결과보다 모두 높게 나타났다. 반사계수가 가장 낮은 μ_{\max} 값은 파 기울기 1/20과 동일하게 $0.5s^{-1}$ 로 나타났고, 이 때 반사계수는 약 1.1%로 비록 파 기울기 1/20의 결과보다 높지만 초기 설계한 파랑의 일관성이 유지된다고 판단하였다. 파 높낮이의 공간상의 변화 또한 파 기울기 1/20의 결과와 유사한 것을 Fig.9에서 확인할 수 있다.

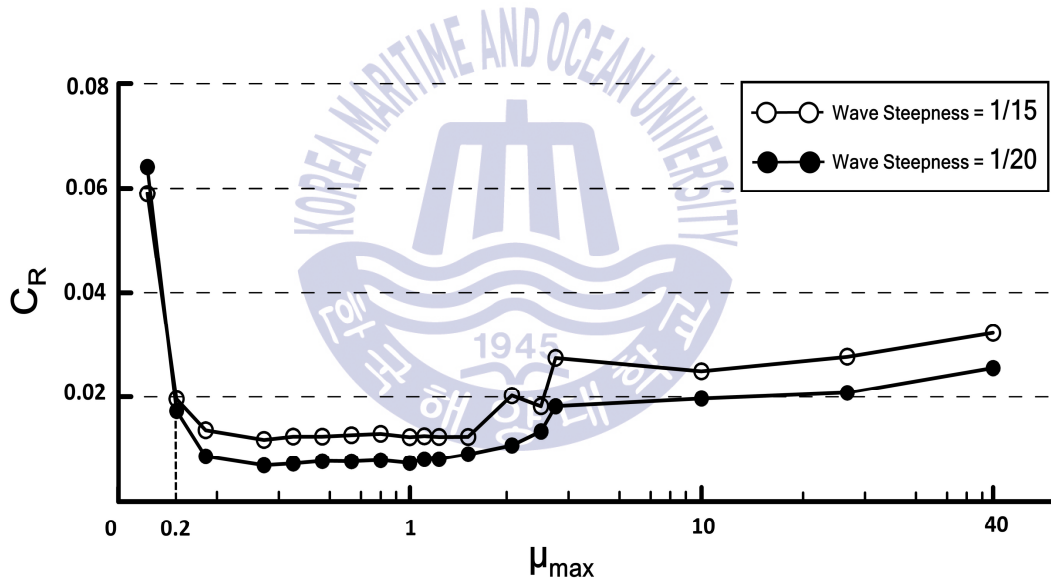
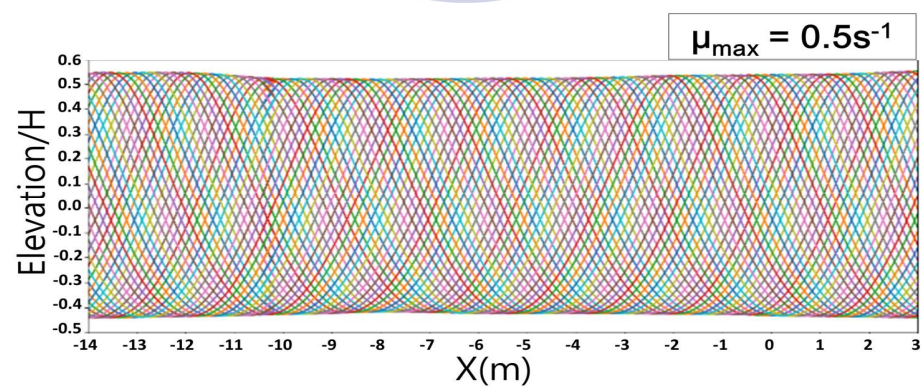
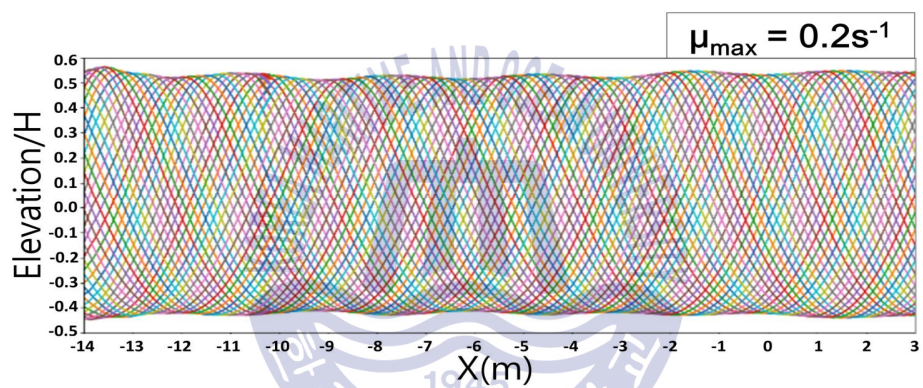
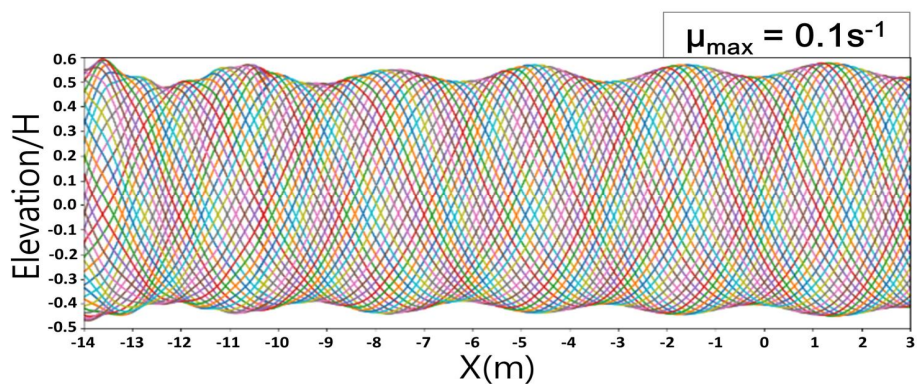


Fig. 8 Comparison of C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} in different wave steepness conditions



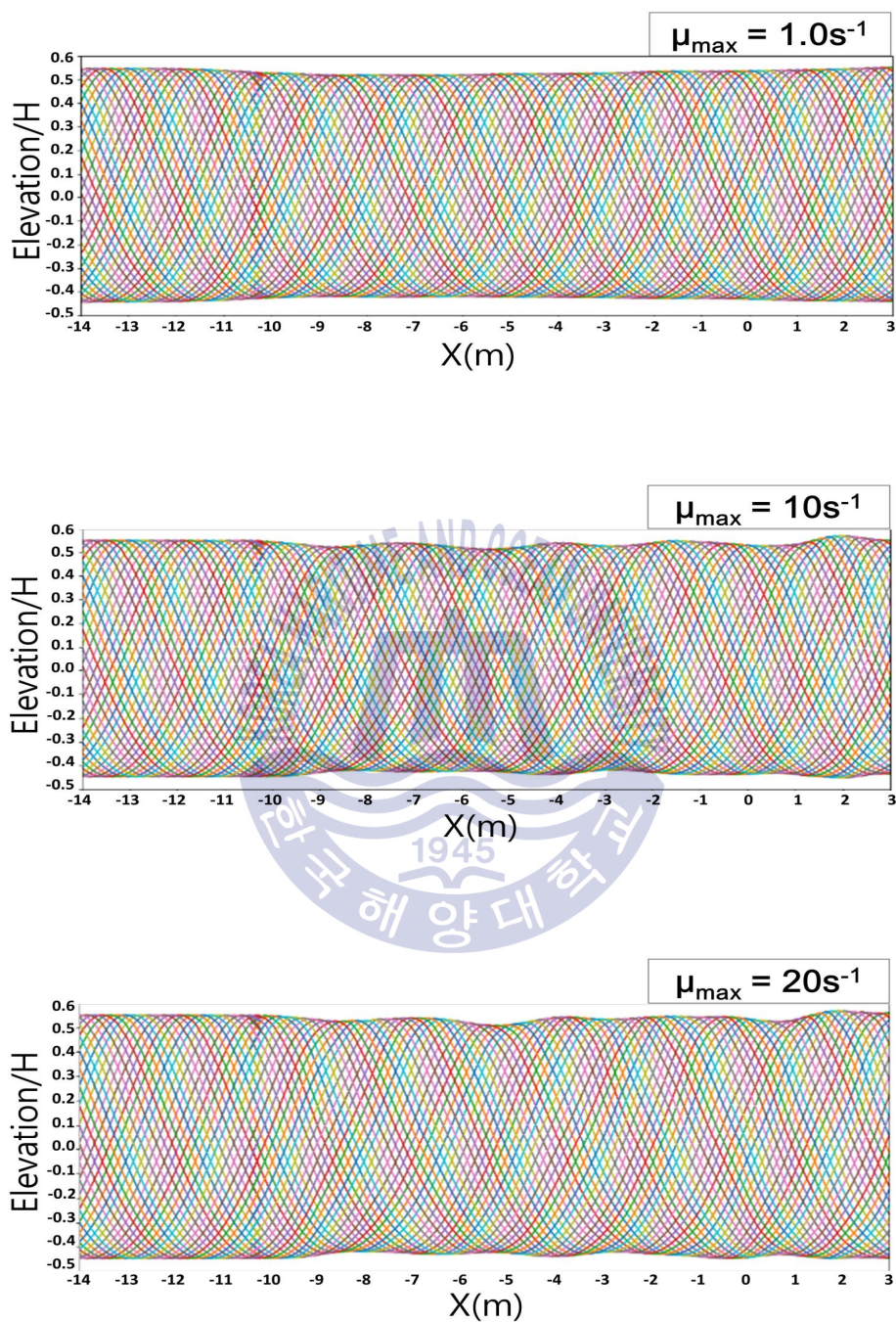


Fig. 9 Wave elevation over x -location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different μ_{\max} value conditions
 ($\lambda = 6.24\text{m}$, wave steepness = $1/15$)

세 번째 절차로서 EOM이 적용되는 감쇠구간의 크기에 따른 반사계수 결과와 시간간격에 따른 파 높낮이를 각각 Fig. 10와 Fig. 11에 나타내었다. 이 때 μ_{\max} 는 앞서 구한 감쇠효율이 가장 높은 $0.5s^{-1}$ 로 설정하였고, 다른 조건은 첫 번째 절차와 동일하게 설정하였다. 감쇠 구역이 없는 경우, 즉 감쇠방식이 적용되지 않는 경우는 Fig.11의 첫 번째 그래프에서 확인할 수 있듯이, 초기 설계한 파랑이 포락선(wave envelope)을 가지는 파속(wave packet)을 형성하여 부분적인 정상파(partial standing wave)의 형태를 가까워지게 된다. 또한 감쇠구간의 크기를 0.75λ ($\lambda=6.24m$)이상 설정할 경우 정상파의 형태에서 벗어나 시간간격에 따른 파의 높낮이가 일정해지는 것을 확인할 수 있다. 이때 반사계수가 1%이하로 줄어들면서 감쇠효율이 좋은 것을 Fig.10을 통해 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 감쇠구간 크기 0.75λ 와 0.5λ 에서의 반사계수 차이를 고려해 감쇠구간을 1λ 이상 설정하는 것이 반사파 감쇠 효율 측면에서 적절하다고 판단하였다.

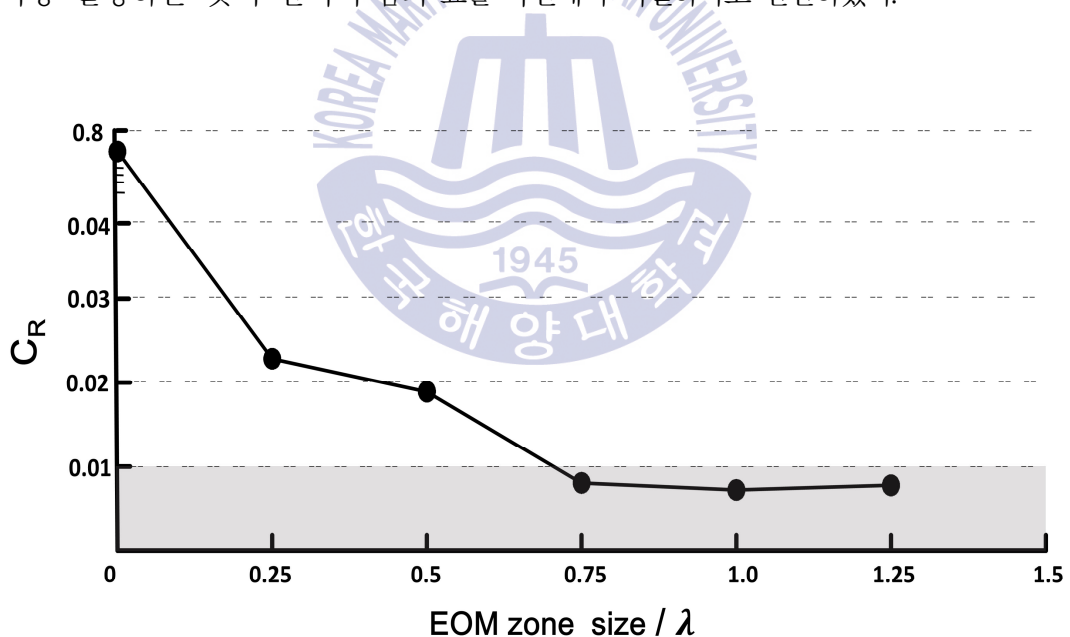
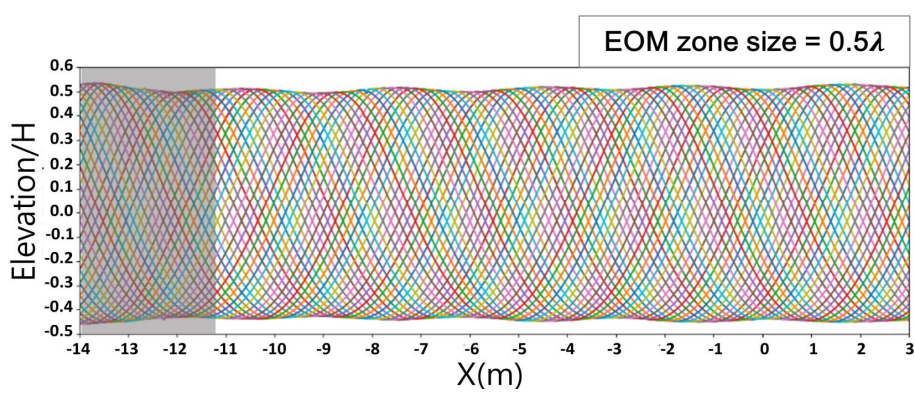
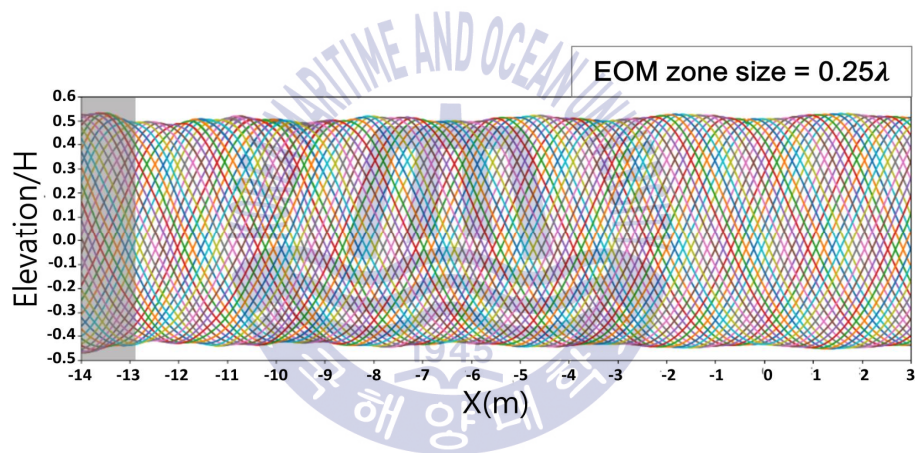
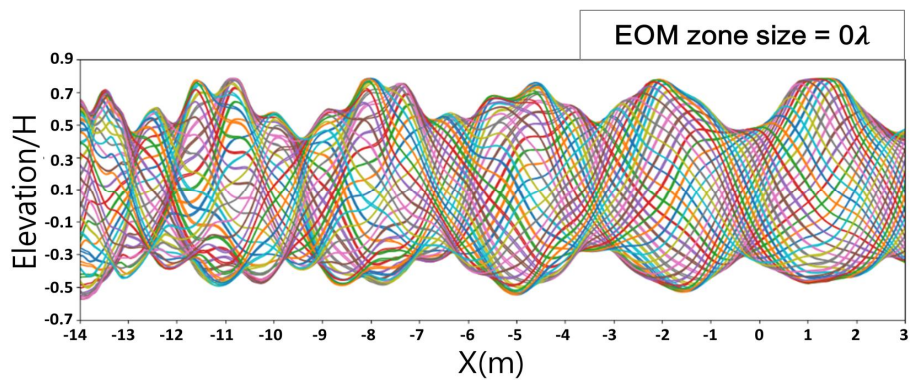


Fig. 10 C_R (reflection coefficient) over EOM zone size ($\lambda=6.24m$)



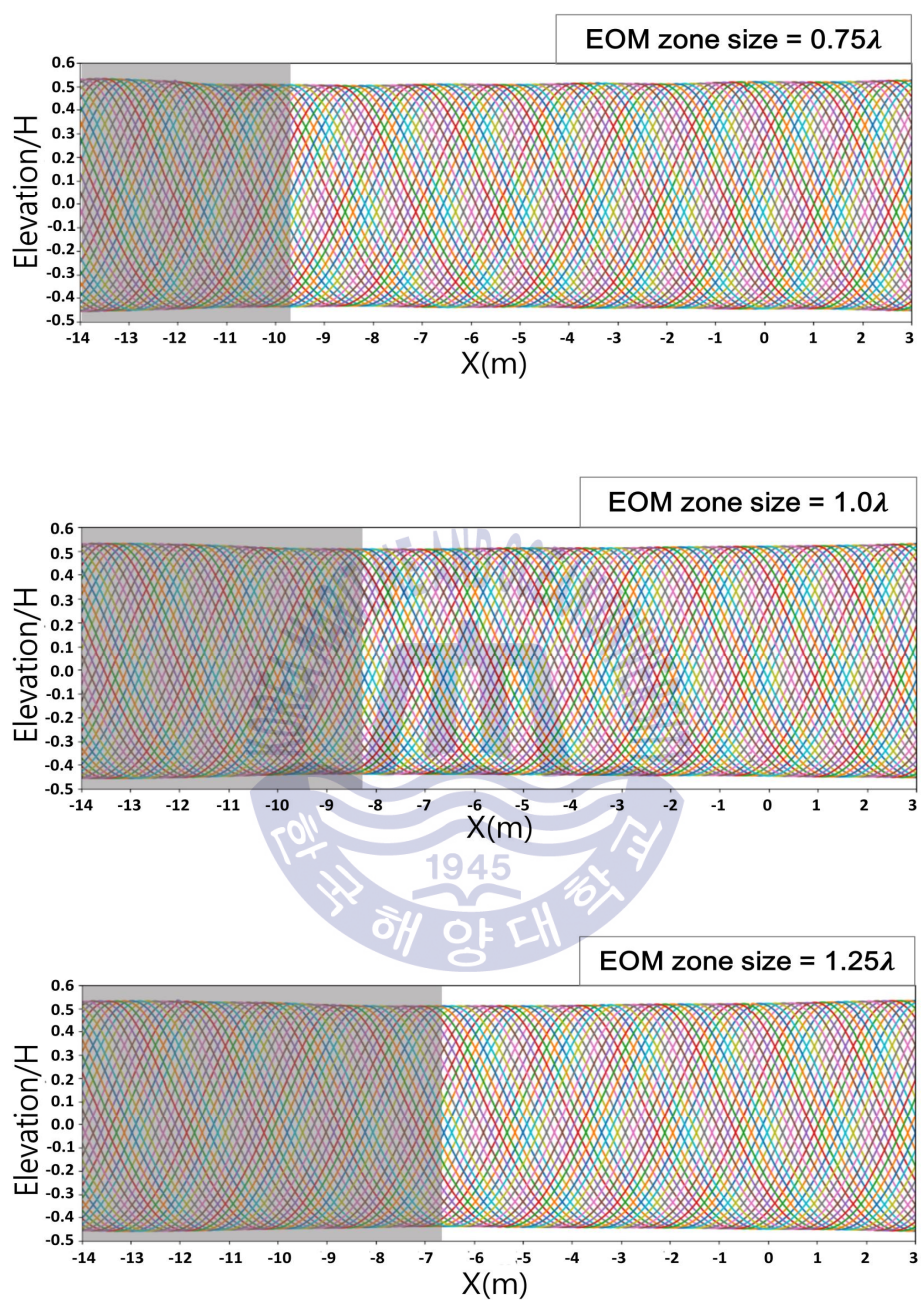


Fig. 11 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period in different EOM zone size conditions
($\lambda=6.24m$, Wave steepness = $1/20$)

마지막 절차의 결과로서 Fig.12는 기준 파($\lambda=6.24\text{m}$)의 절반 크기의 파랑에 대해 μ_{\max} 에 따른 반사계수를 기준 파장과 비교하여 나타내고 있다. 파장이 절반인 경우에 $\mu_{\max}=0.7\text{s}^{-1}$ 에서 반사계수가 가장 낮은 것으로 나타났다, 이 결과는 첫 번째 단계에서 구한 최적의 μ_{\max} 값(0.5s^{-1})에 대해 스케일 법칙(식 (8))을 통해 구한 μ_{\max} 값(0.72s^{-1})과 근사한 것을 확인하였다.

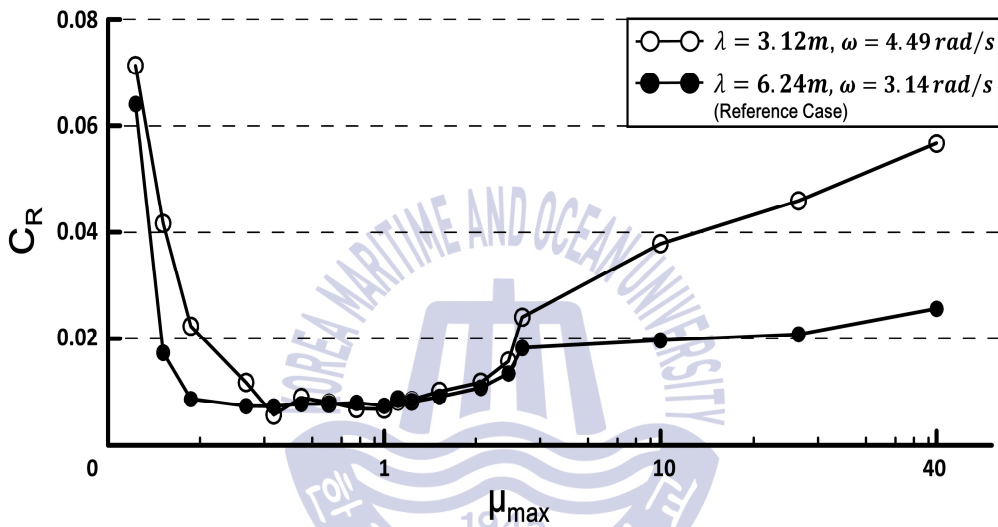


Fig. 12 Comparison of C_R (reflection coefficient) over μ_{\max} in different wave length conditions

추가 검증을 위해 파장이 2배인 파랑($\lambda=12.64\text{m}$)에 스케일 법칙을 통해 구한 μ_{\max} 값을 적용시켜 확인한 결과, Fig.13에서 보이는 바와 같이 전체 도메인 내에서 파랑의 높낮이가 일관성이 있게 유지 되는 것을 볼 수 있다. 이때 반사계수 또한 약 0.069%로 반사파에 의한 영향이 미소한 것을 확인하였다.

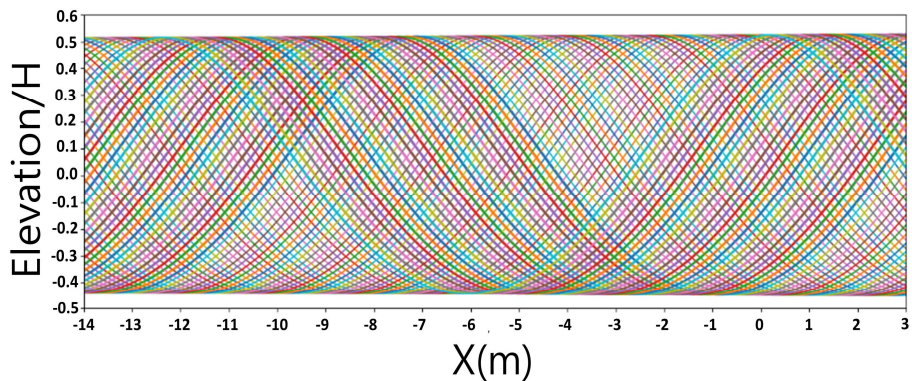


Fig. 13 Wave elevation over x-location recorded at 40 equally spaced time instances per wave period ($\lambda=12.64\text{m}$)

앞서 수행한 파라메트릭 연구의 결과를 종합하여 최종적으로 eomFoam을 이용한 파랑모사 시 도메인 경계에서 발생하는 반사와 감쇠를 위한 가이드라인으로써 다음과 같이 제시한다.

1. *Optimal* $\mu_{max} = 1/2\pi \cdot \omega$, ω : Wave frequency
2. *EOM zone size* = $1\lambda \sim 1.5\lambda$, λ : Wave length

Fig. 14 Guidelines for eomFoam set-up

제 3 장 불규칙파 중 선체 운동응답

3.1 불규칙파 구현

불규칙파 중 선박의 운동응답을 해석하기에 앞서 대상물체가 없는 2D CFD 도메인에서 불규칙파를 구현하였다. 먼저 대상 스펙트럼으로 Fig.15와 같이 실선 기준의 주파수 영역 $0.2\text{rad/s} \sim 1.0\text{rad/s}$ 구간에서 유의파고($H_{1/3}=2\text{m}$, full scale)를 고려해 파 스펙트럼 밀도가 일정한 white noise 스펙트럼을 설계하였다. 이후 역푸리에 변환을 통해 도출한 white noise 스펙트럼에 대한 불규칙파 시계열 데이터를 1장에서 소개한 eomFoam 솔버의 Input data로 구성하여 실제 CFD 도메인 내의 유입경계면(Inlet)에 파 정보로써 입력하는 방식으로 불규칙파를 구현하였다.

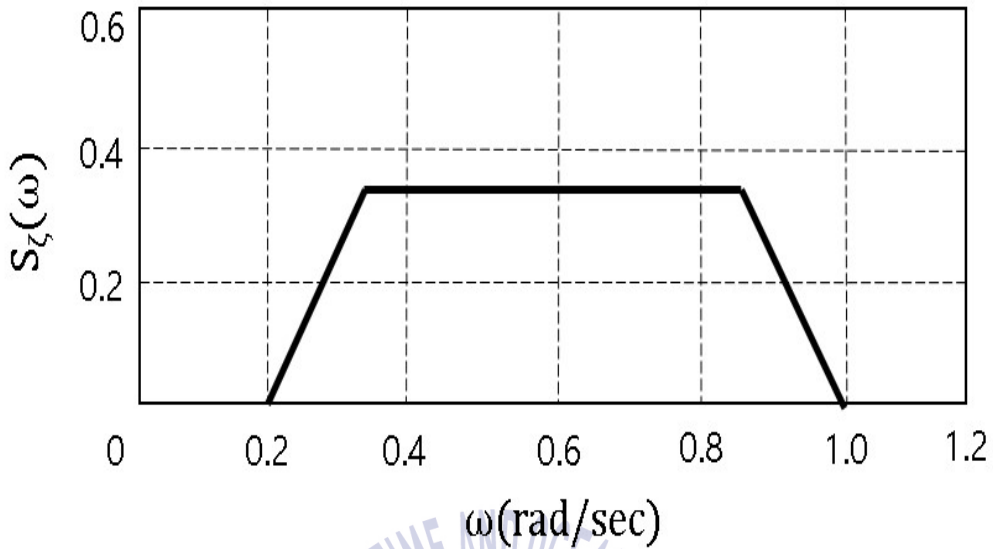


Fig. 15 White noise spectrum

이때, 전체 도메인의 크기는 Fig.16과 같이 추후 선미파 조건(following seas)의 선체 운동해석을 고려하여, -X방향(선미방향)으로 $1.0L_{PP}$, +X방향(선수방향)으로 $1.5L_{PP}$, +Z 및 -Z방향으로 각각 $0.5L_{PP}$, $1.0L_{PP}$ 를 설정하였다. 또한, 자유수면(free surface)을 모사하기 위해 수면 근처의 격자를 조밀(mesh refinement)하게 구성하였고, 이때 유의파고($H_{1/3}=2m$) 당 격자수가 10~11개 정도로 위치하도록 Δz (z방향 cell size)를 설정하였고, Δx 의 경우 Aspect ratio($\Delta x/\Delta z$)가 4 이하가 되도록 구성하였다. 추후 고려할 대상선박인 KCS MOERI 모형선(Fig.18)의 주요 제원은 Table.2와 같다.

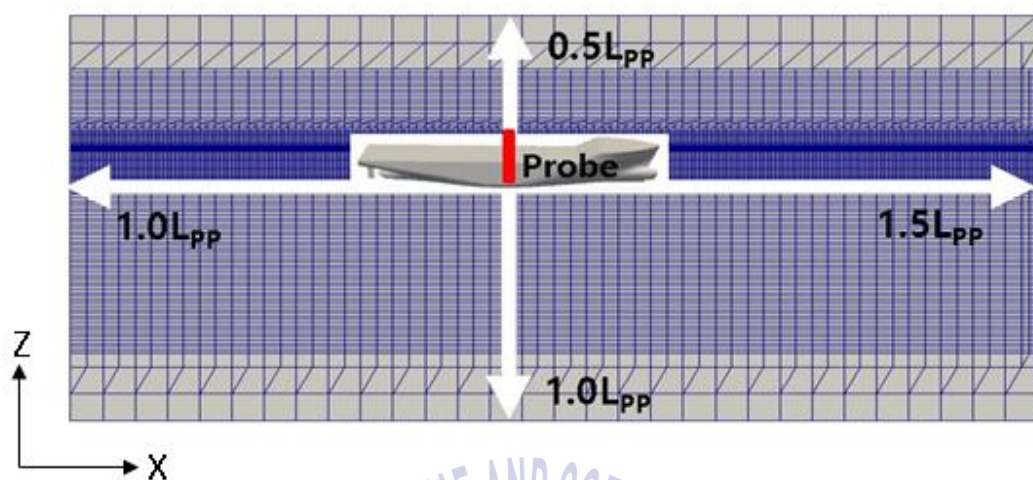


Fig. 16 2D computational domain

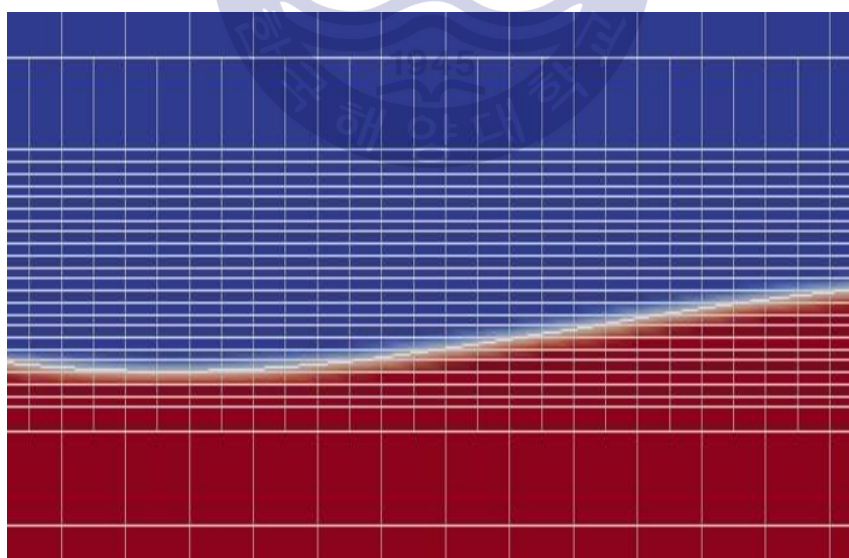


Fig. 17 Mesh configuration around free surface

Table 2 Principal particulars of KCS (MOERI)

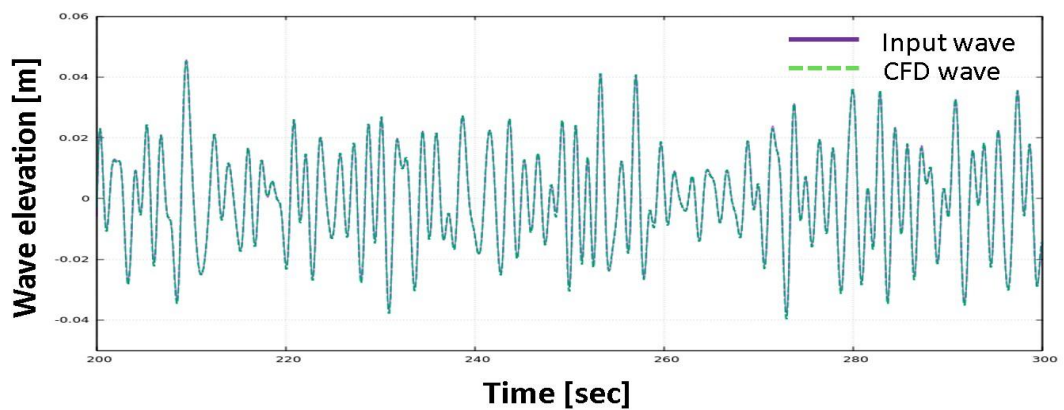
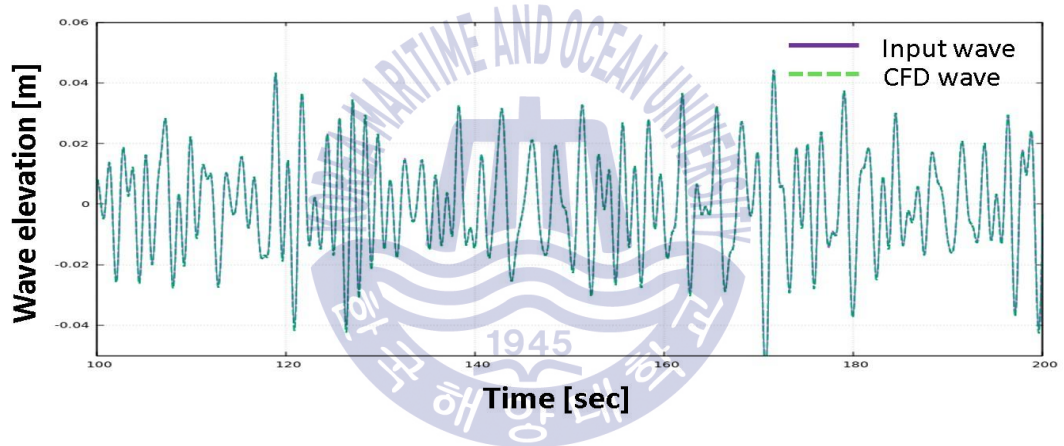
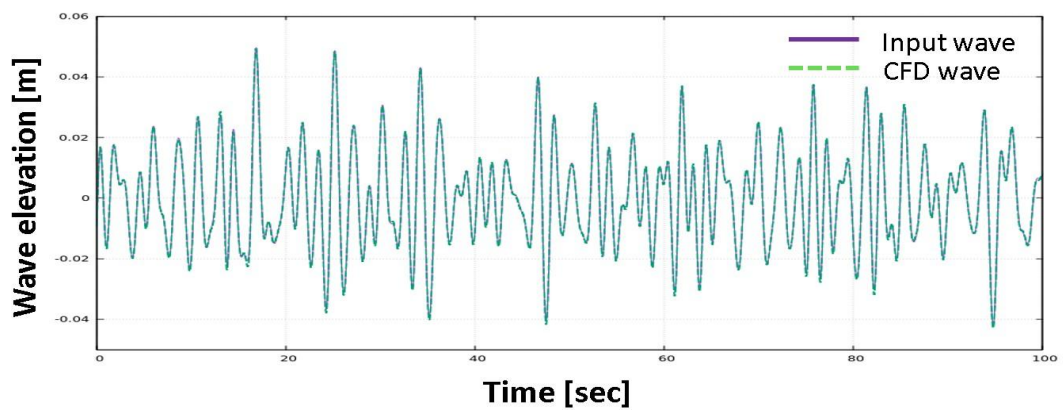
Description	Magnitude
Scale	1/31.599
L_{pp} [m]	7.2786
D [m]	0.6013
T [m]	0.3418
Displacement [m^3]	1.6490
Surface area incl. rudder [m^2]	9.659
LCG [m]	3.532
GM [m]	0.019



Fig. 18 Hull form of KCS

불규칙파 구현 결과로써, Fig.19는 불규칙파 파 높낮이를 시간영역(100초 단위)에 나타내고 있다. 보라색 선은 추후에 고려할 선박의 midship ($x=0$) 위치에 설치한 프루브(Fig.16 참조)에 의해 계측된 불규칙파(CFD wave) 높낮이를 나타내고, 초록색 선은 역푸리에 변환을 통해 초기 설계한 불규칙파(Input wave) 즉, 유입경계면(Inlet)에 입력된 파의 높낮이를 나타낸다. 이때 총 시뮬레이션 시간은 약 500초로 실선 기준 50분 정도에 해당된다. 불규칙파 특성 상 진폭의 정량적인 비교가 어렵지만, Fig. 19에서 보이는 바와 같이 전체적으로 각 과정에서 오차율이 3% 이내로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig.20 및 Table.3은 이 두 가지 파(CFD wave, Input wave)에 대해 스펙트럼 분석을 한 결과를 나타낸다. Fig.20에서 알 수 있듯이, 전체 주파수 영역에 걸친 Input 스펙트럼과 CFD 스펙트럼의 분포는 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 더불어 유의파고를 고려하여 해석 전에 설계한 white noise 스펙트럼(점선) 대비 유입경계면에서 입력된 파(Input wave)에 대한 Input 스펙트럼(x표식)의 분산 값(m_0)은 약 2.9%정도의 작은 오차율을 보였다. 또한, midship 위치의 프루브에서 계측된 파에 대한 CFD 스펙트럼(실선)은 Input 스펙트럼 대비 분산 값에서 약 3.2%의 미소한 차이를 보였다.



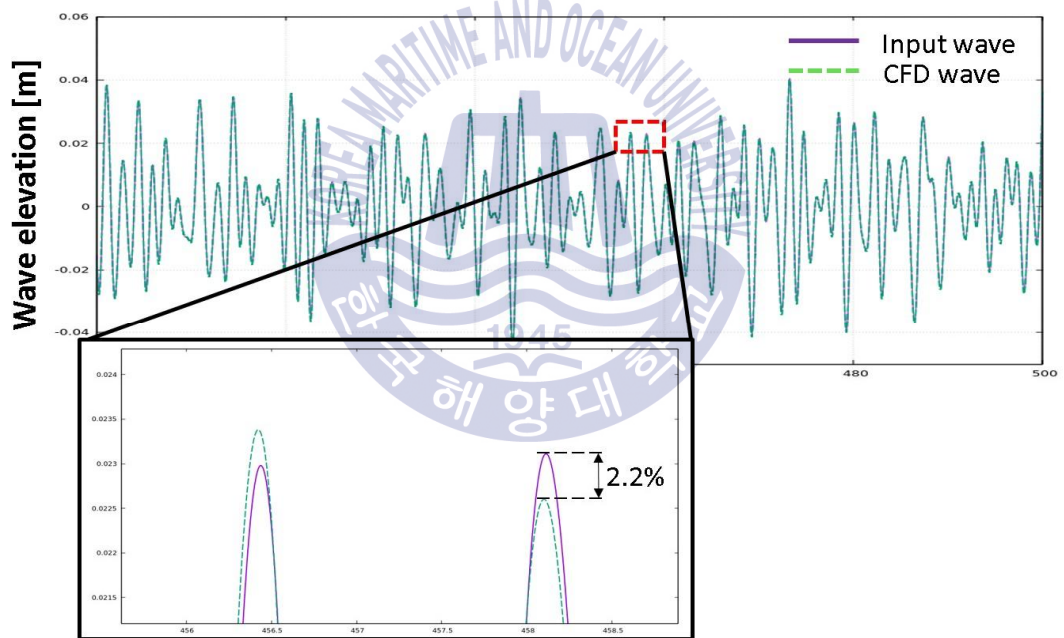
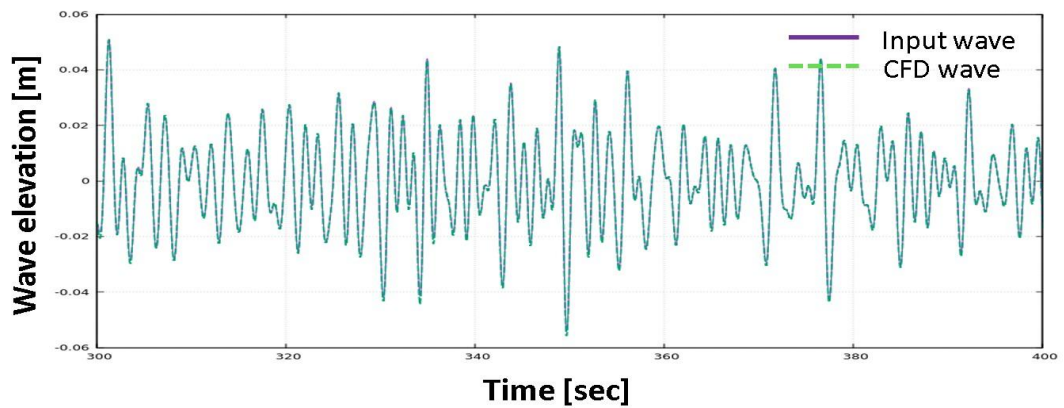


Fig. 19 Comparison of time histories of input wave and CFD wave

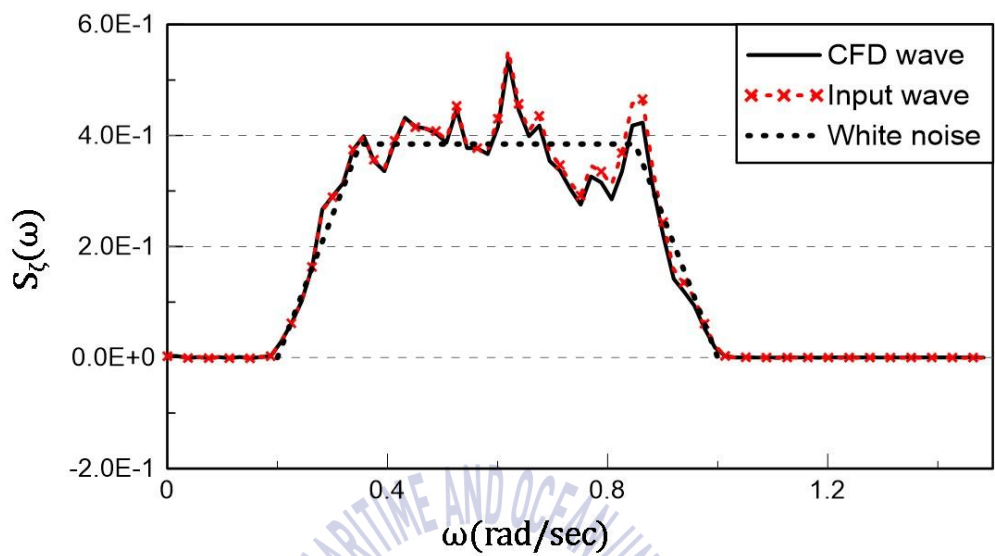


Fig. 20 Comparison of wave spectrums

Table 3 Variances(m_0) of wave spectrums

Wave spectrum	m_0
White noise	0.25
Input	0.2573
CFD	0.2491

3.2 선체 운동해석

3.2.1 격자계 및 해석조건

Fig.xx는 선체 운동응답 해석용 격자계를 나타내고 있다. 파의 진행방향은 선미파 조건(following sea)으로서 선수 방향 경계(Outlet)에서 반사파가 많이 발생할 것이라 판단하여, 도메인의 크기는 선수 방향으로 $1.5L_{pp}$, 선미 방향으로 $1.0L_{pp}$ 그리고 선측 방향으로 각각 $1.2L_{pp}$ 로 설정하였다. 반사파 감쇠를 위한 EOM zone의 크기는 유입 경계면(Inlet) 및 유출 경계면(Outlet)에 각각 $0.5L_{pp}$, $1.0L_{pp}$, 양 선측 방향으로 $0.5L_{pp}$ 크기로 설정하였다.

또한, 자유수면 부근 격자의 파 진행방향(X-axis) 및 수심방향(Z-axis) 격자 개수는 앞서 소개한 불규칙과 구현을 위한 2D 격자계와 동일한 조밀도를 설정하였다. 더불어 선체 표면의 경계층 모사를 위해 Fig.22와 같이 Prism layer Mesher(layer 개수 : 5개, 선체근접격자 크기 : 0.3mm, stretching ratio : 1.1)를 적용하였고 Fig.23에서 보이는 바와 같이 곡률이 높은 선수와 선미 및 타 부분에 조밀한 격자(mesh refinement)를 생성하였다,

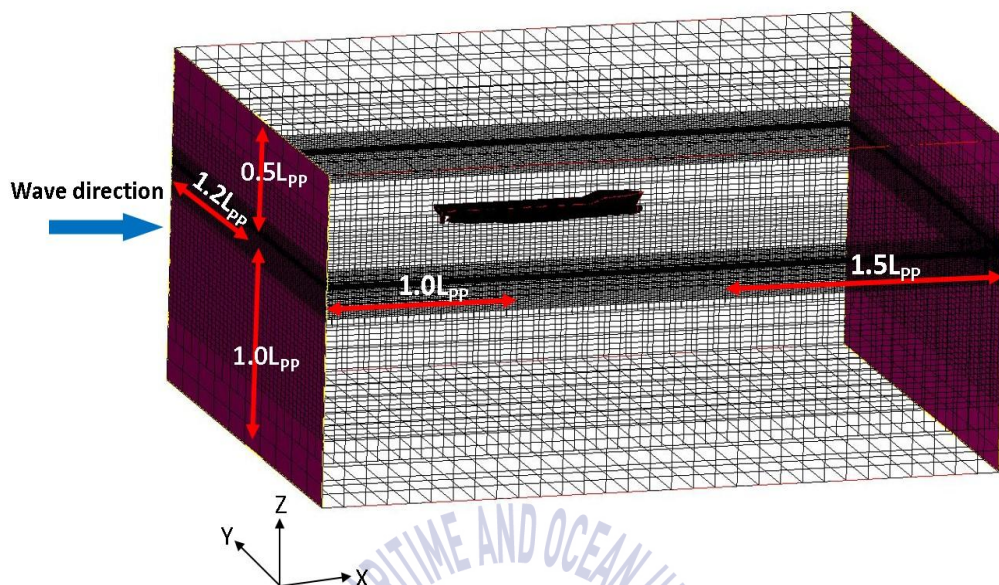


Fig. 21 3D computational domain

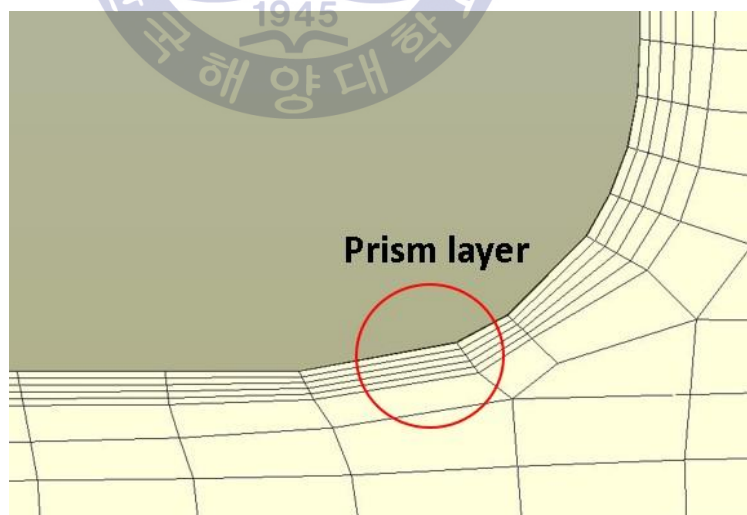


Fig. 22 Prism layer mesher

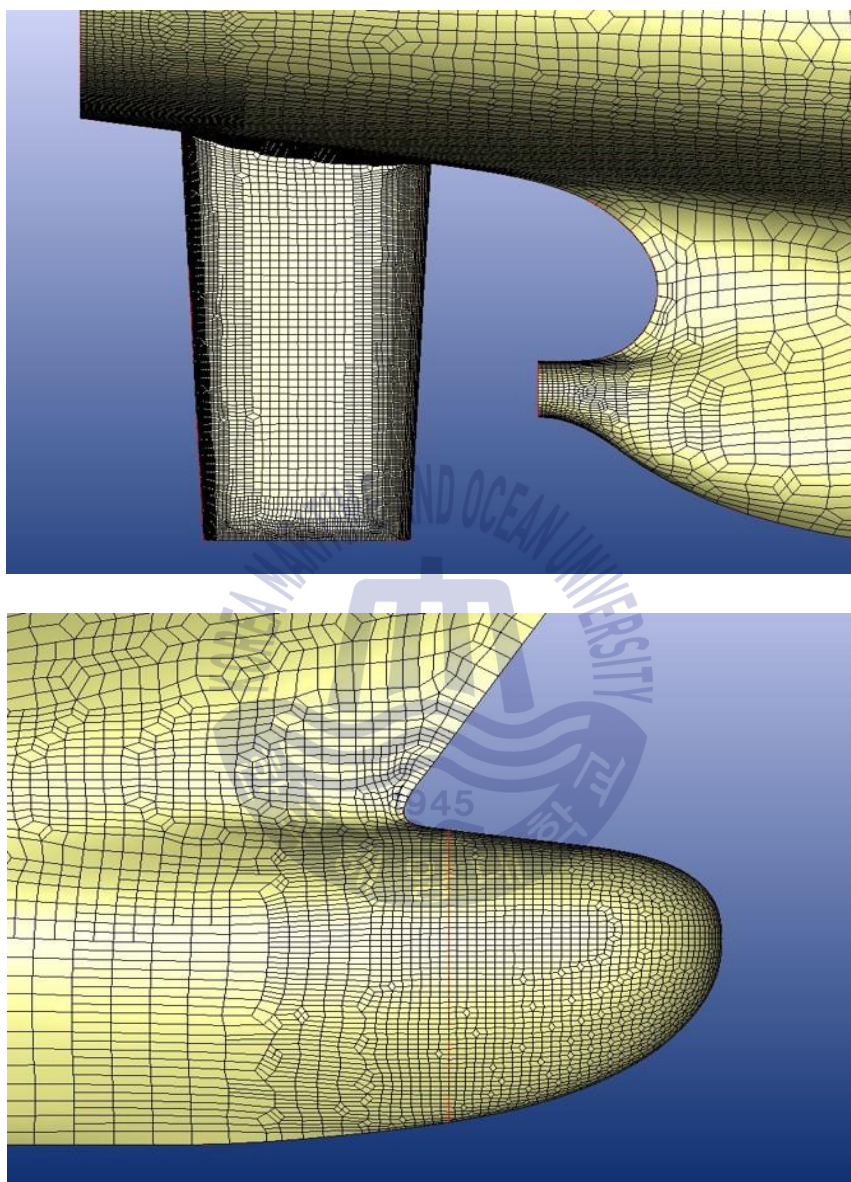


Fig. 23 Surface mesh refinement

수치기법으로서 비정상항에 대해서는 1차 정확도의 Euler기법을 사용하여 차분하였고, 대류항과 확산항의 경우 각각 2차 정확도의 linear-upwind 풍상 차분 기법(Gauss linearUpwind)과 선형 차분 기법(Gauss linear)을 적용하였다. 또한 난류 모델로 $k-\omega$ SST 모델을 적용하였고 총 시뮬레이션 시간은 약 400초로 실선 기준 40분 정도에 해당된다.

더불어 선박의 동적자세변화를 고려하기 위해 OpenFOAM에서 제공하는 sixDofRigidBodyMotion 솔버를 사용하여 격자 변형기법(mesh morphing method)을 적용하였다. 대상물체의 거동을 표현하기 위한 기법에는 격자 재생성 기법(mesh regeneration method), 중첩격자기법(overset mesh method) 등 다양한 기법이 있지만, 본 연구에서는 비교적 작은 변위의 운동에 대해서 계산시간 단축 및 정확도가 검증된 격자 변형기법(mesh morphing method)을 사용하여 상하동요(heave) 및 종동요(pitch)를 평가하였다. 이 기법은 Fig.24와 같이 선체 운동 시, 전처리 단계에서 지정한 선체에 근접한 경계(inner boundary)와 바깥 경계(outer boundary)사이의 격자가 변형(morphing)되면서 선체의 동적 거동을 계산하는 방식이다.

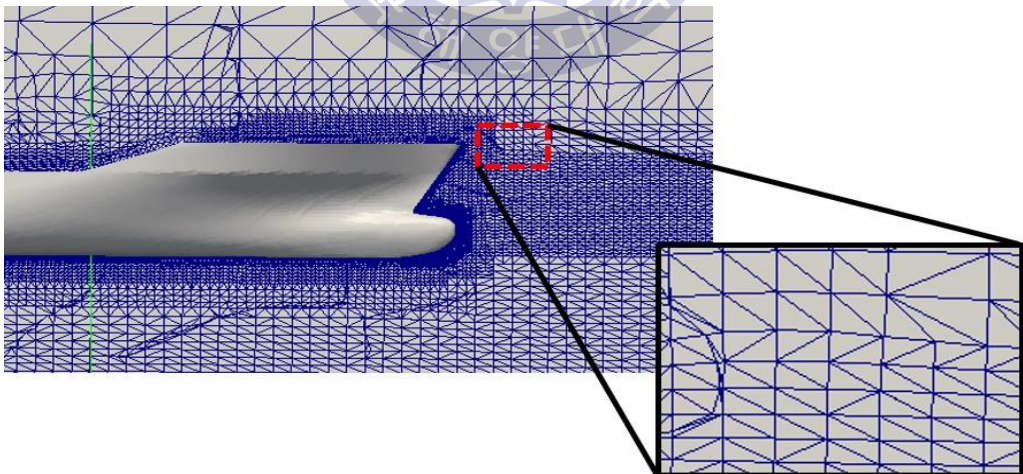
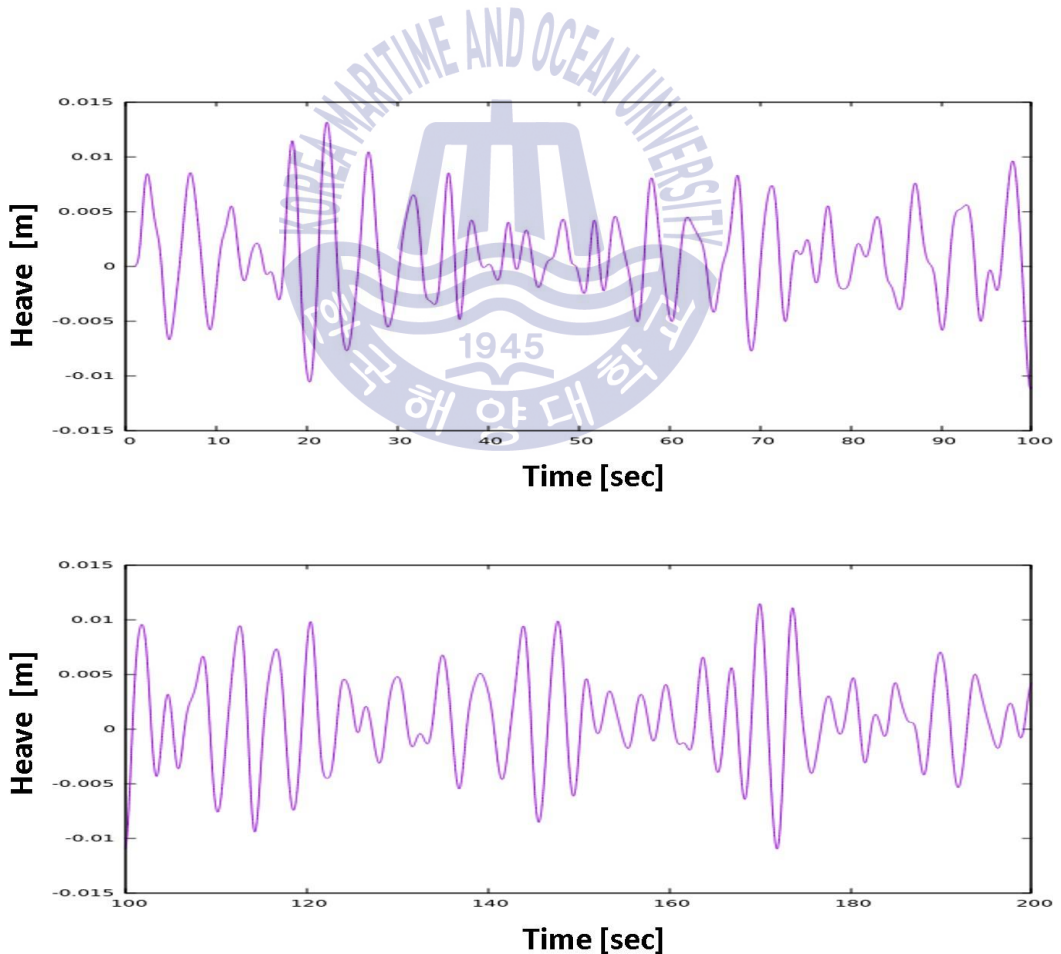


Fig. 24 Mesh morphing method

3.2.2 운동해석 결과

운동해석 결과로써, Fig.25와 Fig.26은 3.1절에서 구현한 불규칙파에 대한 선체의 상하동요(heave) 및 종동요(pitch) 시계열 응답을 보여주고 있다. 상하 및 종동요의 운동진폭이 각각 $\pm 0.015\text{m}$ 구간 $\pm 0.59^\circ$ 구간에서 불규칙하게 변하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, Fig.27과 Fig.28은 각각의 시계열 응답에 대해 푸리에 변환을 통해 구한 상하동요 및 종동요 응답 스펙트럼을 나타내고 있다.



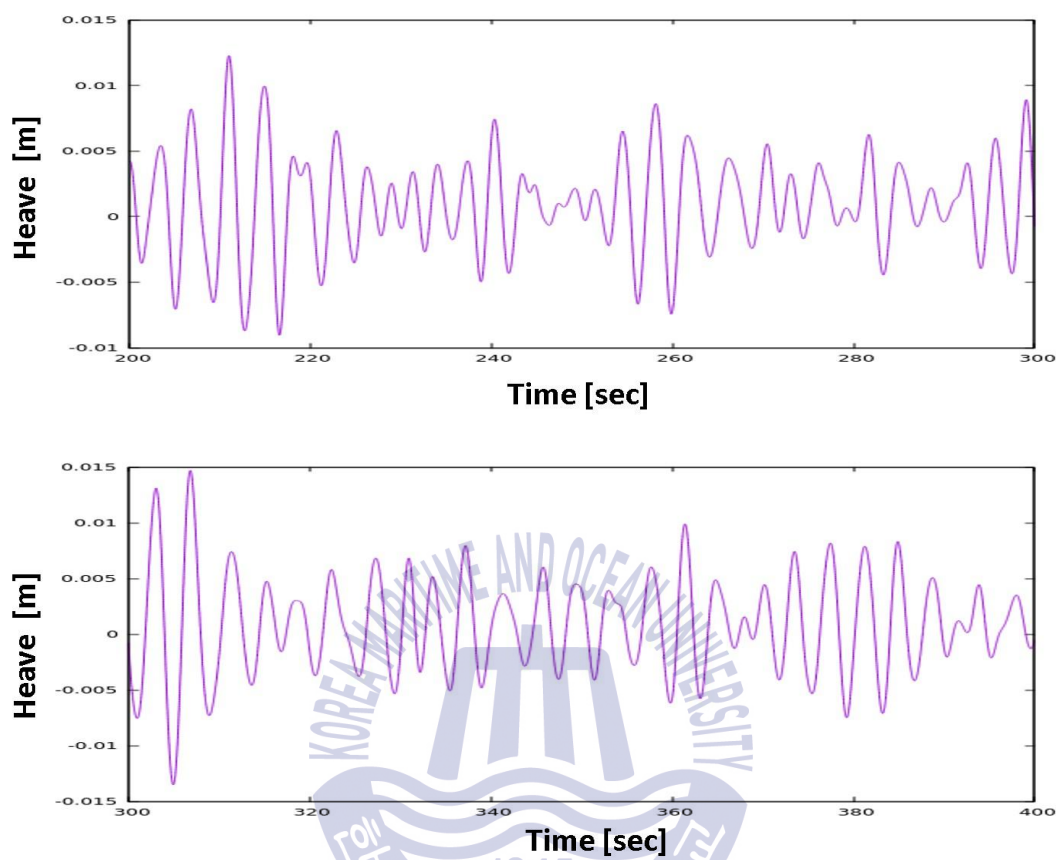
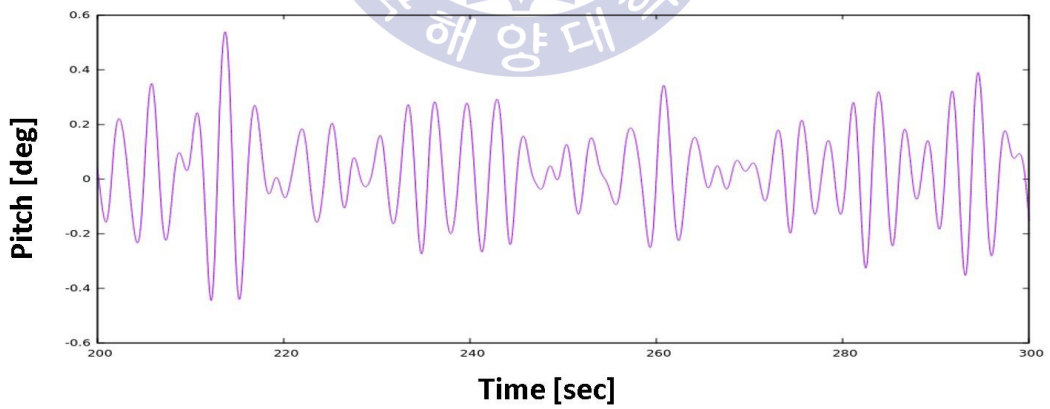
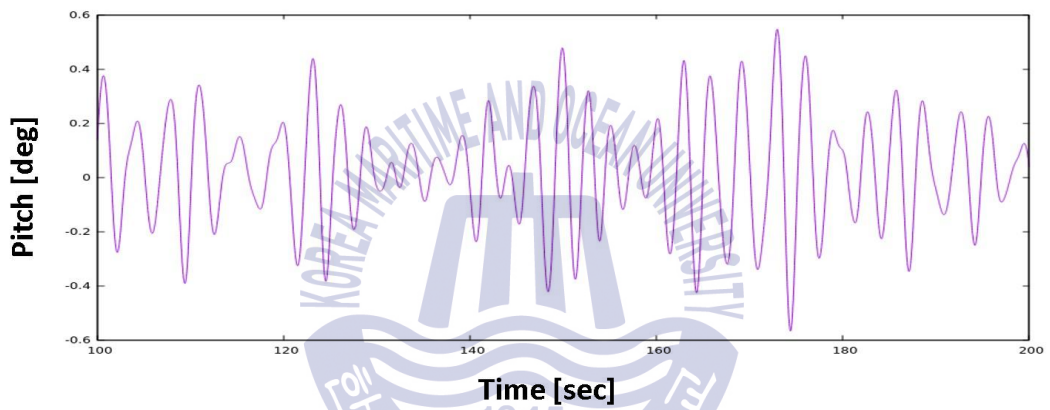
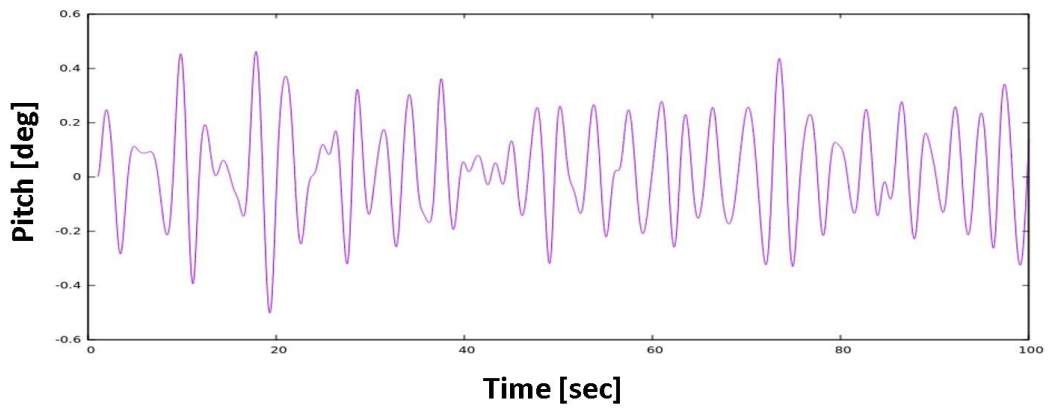


Fig. 25 Time series of heave motion



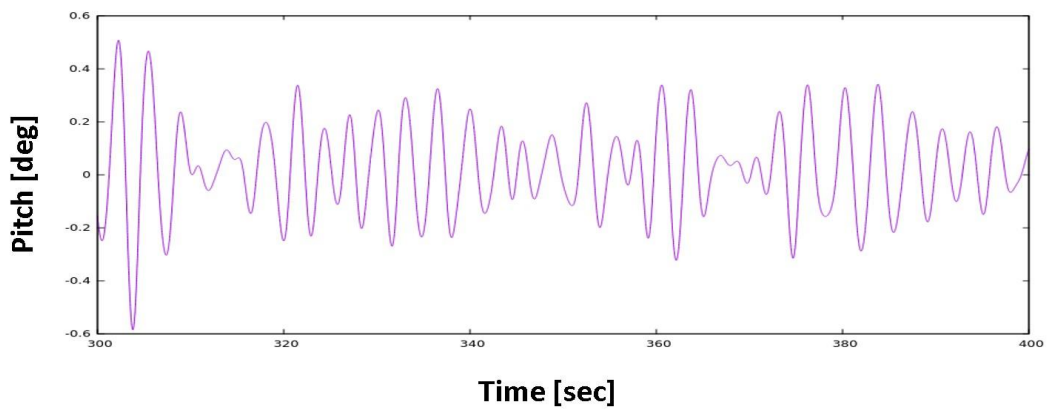


Fig. 26 Time series of pitch motion

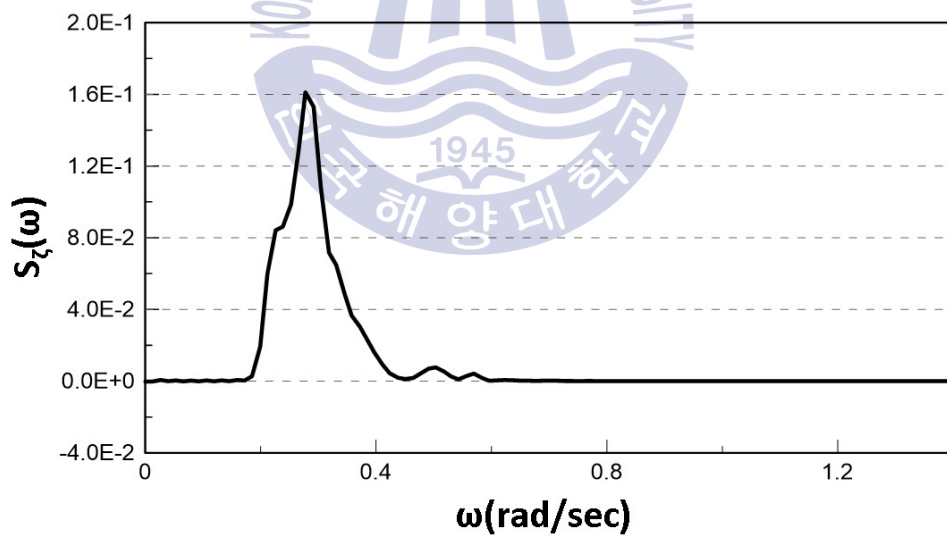


Fig. 27 Response spectrum of heave motion

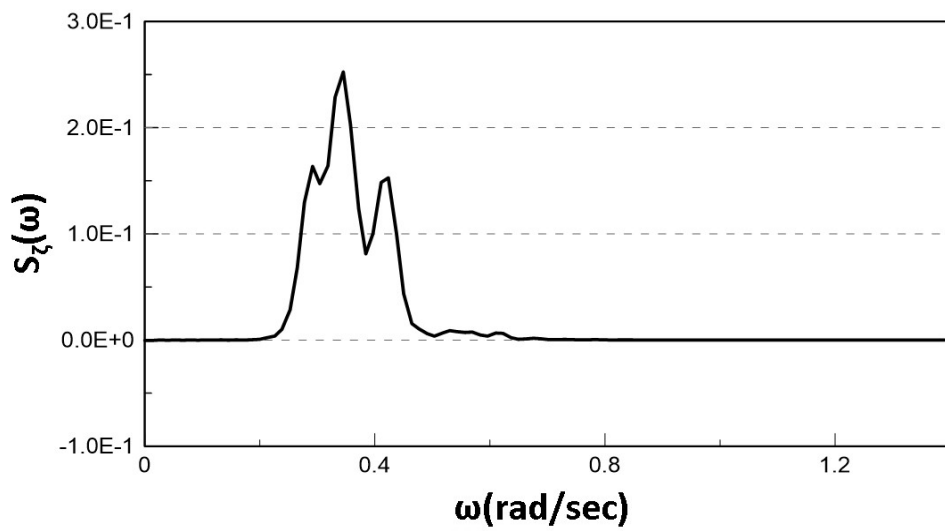


Fig. 28 Response spectrum of pitch motion



앞서 구한 운동 응답스펙트럼을 활용하여 선체의 운동 특성을 알아보기 위해 motion RAOs(Response amplitude operator)를 계산하였다. 이때, 식 (8)과 같이 3.1절에서 구한 불규칙파 스펙트럼을 이용해 상하동요 및 종동요에 대한 RAO를 구하였다.

$$RAO = \frac{Output}{Input} = \left| \frac{\eta(\omega)}{A(\omega)} \right| = \sqrt{\frac{S_j(\omega)}{S_\zeta(\omega)}} \quad (8)$$

$\eta(\omega)$: Motion response amplitude

$A(\omega)$: Wave amplitude

$S_j(\omega)$: Motion response spectrum

$S_\zeta(\omega)$: Wave spectrum

아래 Fig.29와 Fig.30은 도출된 각 운동에 대한 RAO를 운동 응답스펙트럼과 선체 위치에서 계측된 파에 대한 스펙트럼과 함께 나타내고 있다.

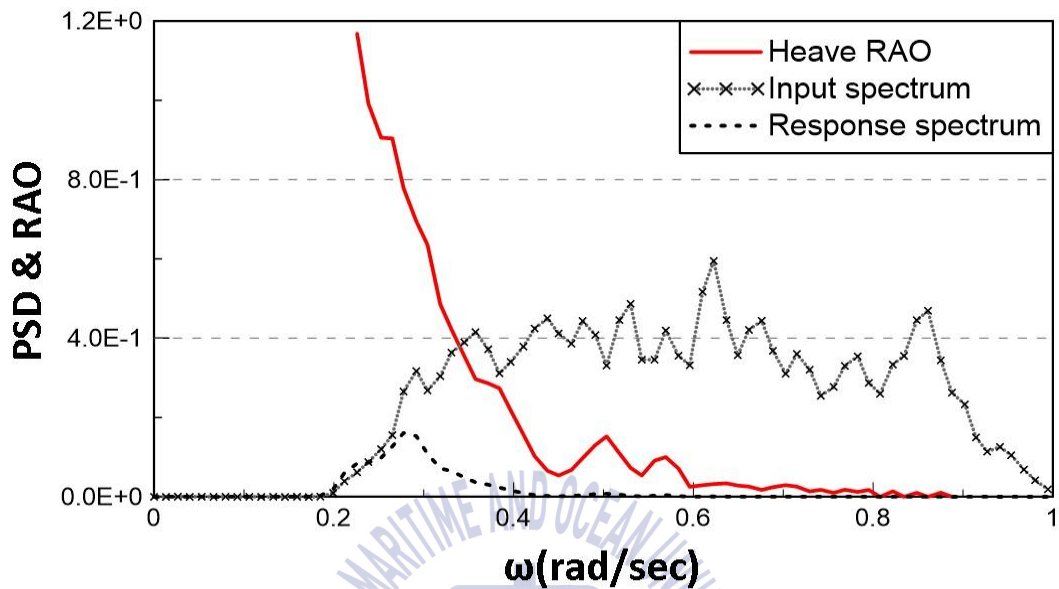


Fig. 29 RAO for heave motion with input and response spectrum

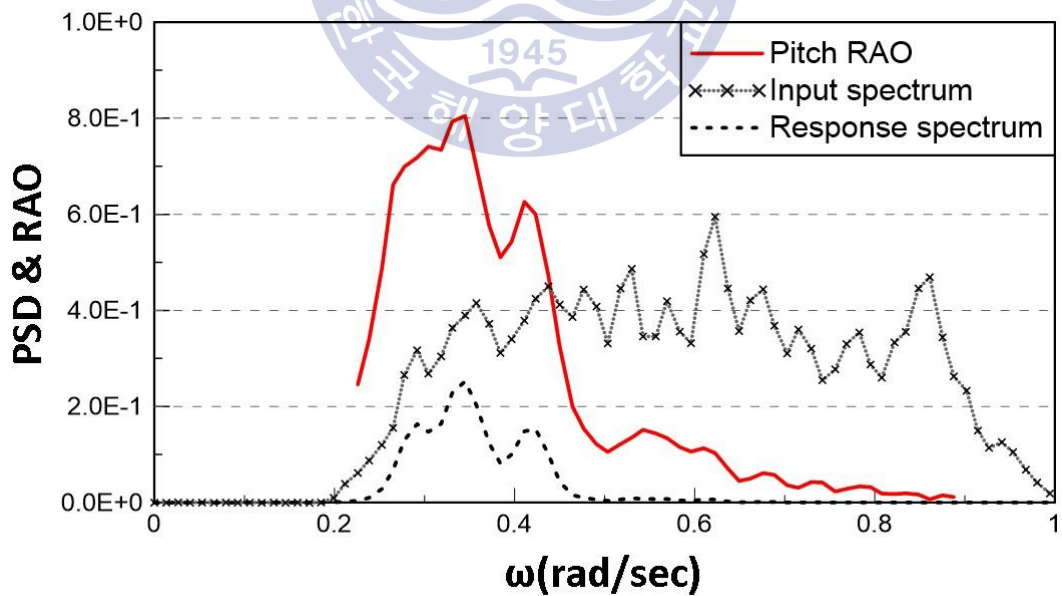


Fig. 30 RAO for pitch motion with input and response spectrum

3.2.3 Motion RAOs 검증

앞 절(3.2.2)에서 구한 상하동요 및 종동요에 대한 RAO를 검증하기 위해 특정 주파수의 규칙파 조건(OpenFOAM) 및 포텐셜 기반 상용 코드인 AQWA와의 결과와 비교하였다. 규칙파 조건 시 전체 도메인 크기 및 수치기법 등 파 조건을 제외한 모든 설정을 불규칙파 조건과 동일하게 구성하여 운동해석을 수행하였다. 운동해석을 위한 입사파 조건은 아래 Table. 4와 같다.

Table 4 Wave conditions for the numerical simulations

Freq. [rad/s]	Wave Height [m]
	[proto/modell].
0.53	2 / 0.0633
0.45	2 / 0.0633
0.25	2 / 0.0633

이때, Fig.31 및 Fig.32와 같이 각 주파수 조건의 상하동요 및 종동요의 시계열에서 정상상태(steady state)의 구간의 평균 운동 진폭을 구한 후, 최종적으로 주파수 별 운동 RAO를 도출하였다.

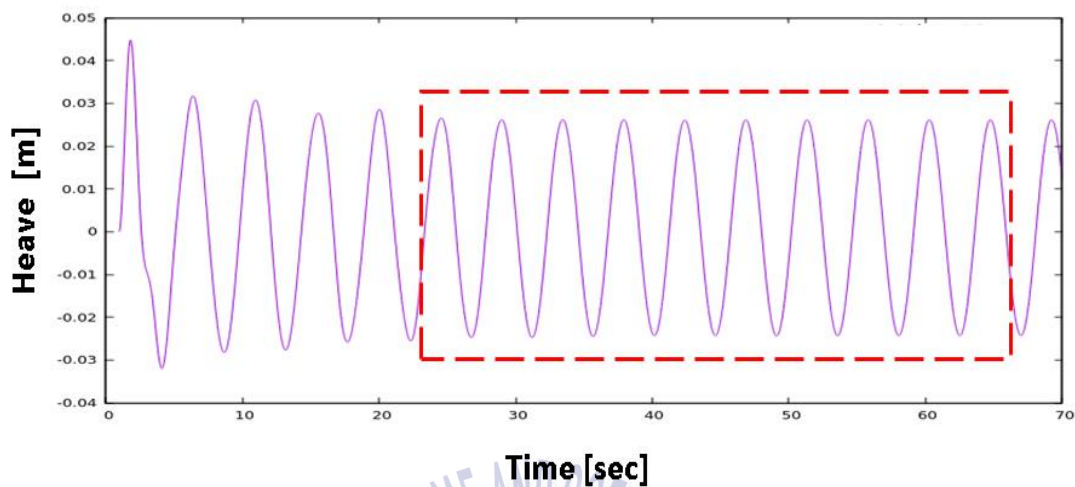


Fig. 31 Time series of heave motion

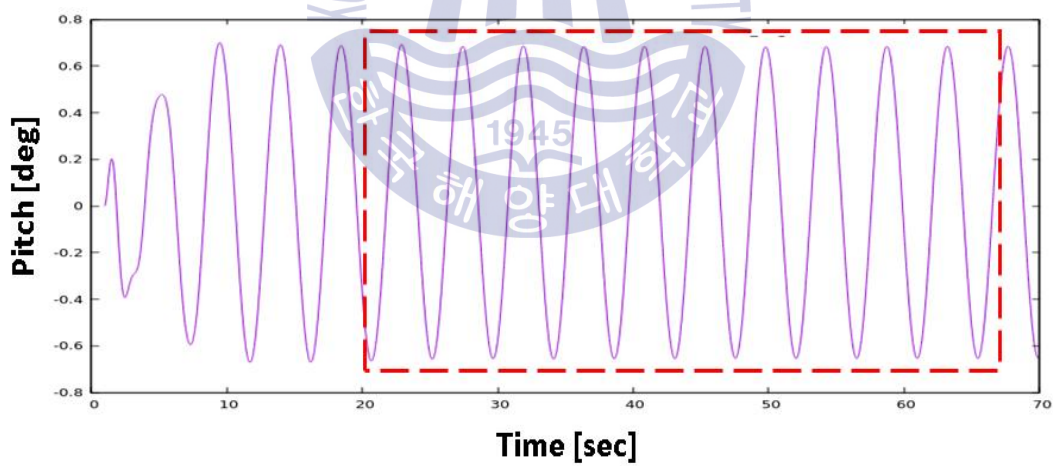


Fig. 32 Time series of pitch motion

Fig.32 및 Fig.33은 앞서 설명한 세 가지 조건에서 구한 상하동요 및 종동요 RAO를 서로 비교하고 있다. 규칙파 조건의 결과와 비교하였을 때, 각 주파수에서 적은 오차가 존재하지만, 전체적인 분포 경향은 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그러나 AQWA 해석결과를 보면 고주파수 영역(0.6rad/s 이상)에서 상하동요 및 종동요 RAO의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 또한, AQWA 결과에 비해 전체적인 RAO 분포가 저주파수 영역으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 분석으로, 자유수면 부근 격자계 분포 및 PIMPLE 알고리즘 반복 횟수의 한계 등의 영향으로 불규칙파 기반 운동해석 시 단주기의 선체 운동이 세밀하게 묘사되지 못하고 장주기 운동으로 나타나게 되어 고주파수 영역의 응답 스펙트럼 밀도가 제대로 형성되지 못한 것으로 판단된다.



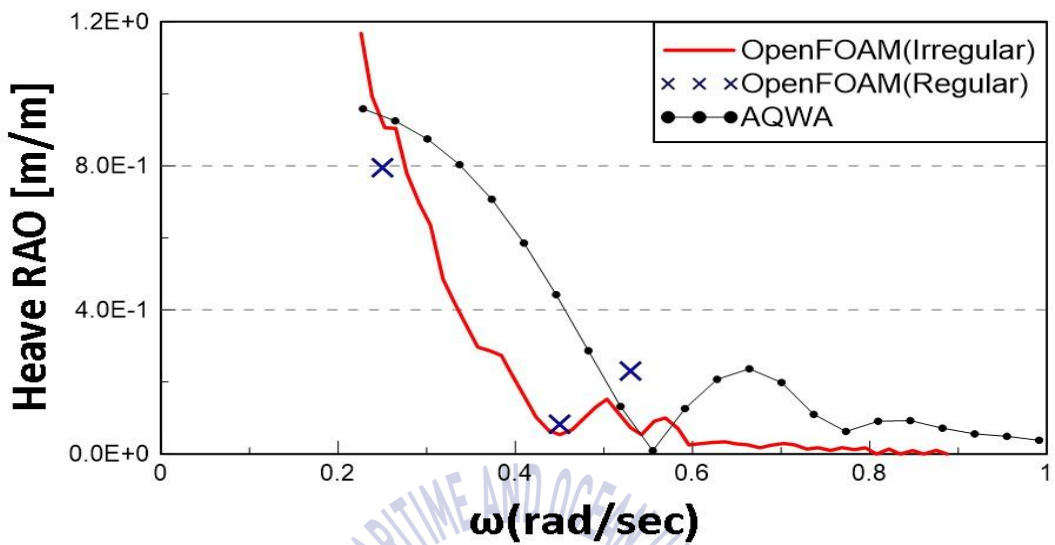


Fig. 32 Comparison of heave RAOs in different conditions

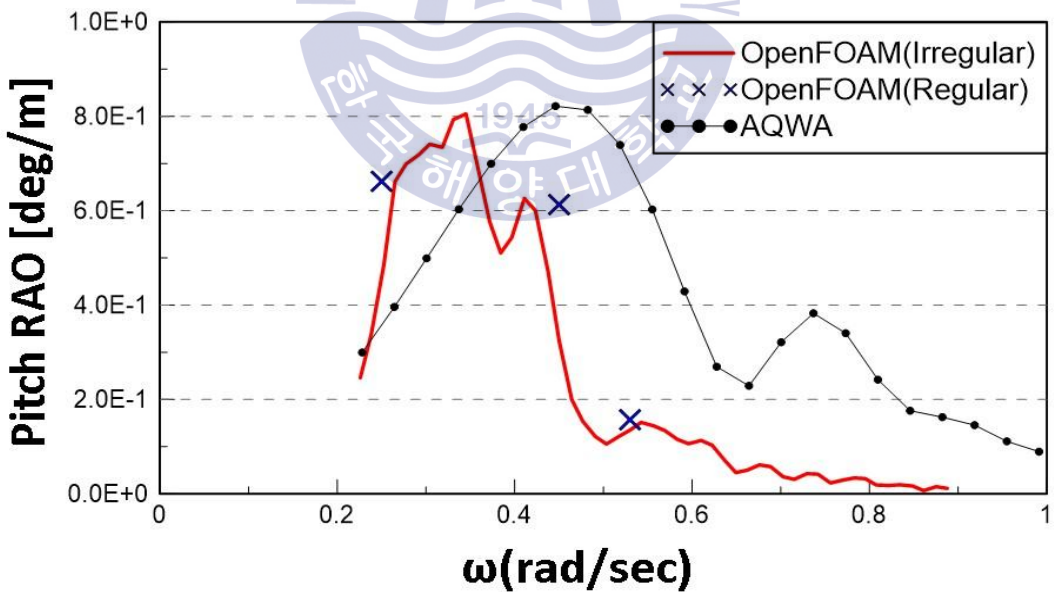


Fig. 33 Comparison of pitch RAOs in different conditions

제 4 장 결론

본 연구에서는 선박의 운동성능 해석에 있어 CFD 기법의 정확도 및 적용가능성을 검토하고자 오픈소스 CFD 프로그램인 OpenFOAM을 활용하여 KCS를 대상으로 운동해석을 수행하였다.

운동해석 전 사전 연구로써 반사파 감쇠 방식 중 하나인 Euler Overlay Method를 OpenFOAM에 적용시켜 eomFoam이라는 솔버를 개발하고 파 생성 시 최적의 반사파 감쇠 효율을 위해 파라메트릭 연구를 수행하였다. 감쇠강도를 나타내는 μ_{\max} , 파 기울기(wave steepness), EOM이 적용되는 구간(EOM zone)의 크기를 파라메터로 설정하고, 반사계수(C_R)를 통해 감쇠 효율을 정량적으로 평가하였다. 또한, 다른 주파수의 파에 대해 주파수 비율에 따른 스케일 법칙을 통해 최적의 μ_{\max} 값 적용 가능 여부를 검증하였다.

파장 6.24m의 파에 대해 $0.1s^{-1}$ 부터 $40s^{-1}$ 까지 총 18개의 μ_{\max} 에 따른 반사계수를 비교한 결과 $\mu_{\max}=0.5s^{-1}$ 에서 감쇠효율이 가장 높은 것으로 나타났고, 같은 조건에서 파 기울기(wave steepness=1/20, 1/15)만 변화시킨 경우에도 최적의 μ_{\max} 값이 동일한 것을 확인하였다. 또한, EOM zone의 크기는 초기 설계한 파의 파장 대비 1.0~1.5배 정도의 크기로 설정하는 것이 반사파 감쇠효율 측면에서 적절하다고 판단하였다. 마지막으로 파장이 절반인 파($\lambda=3.12m$)에 대해 반사계수 비교로 구한 최적의 μ_{\max} 값이 기준 파랑($\lambda=6.24m$)에 대해 스케일 법칙

을 적용한 결과와 근사한 것을 확인하였다. 최종적으로 eomFoam을 이용한 파랑모사 시 반사파 감쇠를 위한 가이드라인을 제시하였다.

이후, 불규칙파 중 선체 운동 해석을 위해 먼저 eomFoam을 활용하여 불규칙파를 구현하였다. 주파수 영역에서 파 에너지 스펙트럼 밀도가 일정한 white noise 스펙트럼을 활용하여 2D CFD 도메인 내에 불규칙파를 구현하고, 이를 초기에 스펙트럼에 대해 역푸리에 변환을 통해 구한 해(analytic solution)와 비교하고 차이가 미소함을 확인하였다.

구현된 불규칙파를 활용하여, 3D 도메인에서 선체의 운동응답 해석을 수행하였다. 선미파(following sea)조건에서 수행되었고, 선체 운동을 처리하기 위해 OpenFOAM에서 제공하는 격자 변형기법(mesh morphing method)을 사용하여 상하동요 및 종동요 응답을 계산하였다. 계산된 운동응답 시계열에 대한 선체 응답 스펙트럼을 활용하여 각 운동(상하동요, 종동요)에 대한 RAO(Response Amplitude Operator)를 도출하였다. 마지막으로 이를 검증하기 위해 AQWA 및 규칙파 조건에서 선체의 운동 RAO를 구하고, 이를 불규칙파 조건과 비교하였다. 규칙파 조건 결과와는 작은 오차가 존재하지만, 전체적인 경향은 비슷한 것을 확인하였다. 하지만, AQWA 해석결과에 비해 고주파수 영역(0.6rad/s 이상)에서 상하동요 및 종동요 RAO의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 전체적인 RAO 분포가 저주파수 영역으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 따라서 좀 더 정확한 운동해석을 위해서는 자유수면 주위 격자계의 조밀도 조정 및 PIMPLE 알고리즘 반복 횟수를 증가시키는 것이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- Bøckmann, A. Pákozdi, C. Kristiansen, T. Jang, H. & Kim, J., 2014. An experimental and computational development of a benchmark solution for the validation of numerical wave tanks. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, CA, USA, 8-13 June 2014
- Chen,, H.C. & Yu, k., 2009. CFD Simulation of Wave-Current-Body Interactions Including Greenwater and Wet Deck Slamming. *Journal of Computers and Fluids*, Vol. 38, No. 5, pp.970-980.
- Issa, R.I., 1985. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, 62, pp.40-65.
- Jacobsen, N.G. Fuhrman, D.R. & Fredsøe, J., 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), pp.1073-1088
- Kim, J., Jaiman, R., Cosgrove, S., O'Sullivan, J., 2011. Numerical Wave Tank Analysis of Wave Run-up on a Truncated Vertical Cylinder. *Proceeding of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, The Netherlands, ASME, 1, pp.805-814.

Kim, J., Tan, J. H. C., Magee, A., Wu, G., Paulson, S., Davies, B., 2013. Analysis of ringing response of a gravity based structure in extreme sea states. *Proceedings of OMAE2013*, Nantes, France.

Kraskowski, M., 2010. Simulating hull dynamics in waves using RANSE code. *Ship technology research*, 57, 2, pp.120-127.

Park, I.R., Kim, J., Kim, Y.C., Kim, K.S., Van, S.H., Suh, S.B., 2013. Numerical Prediction of Ship Motions in Wave using RANS Method. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), pp.232-239.

Patankar, S.V. & Spalding, D.B., 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp.1787-1806.

Perić, R., Abdel-Maksoud, M., 2016. Reliable Damping of Free-Surface Waves in Numerical Simulations. *Ship Technology Research*, 63(1), pp.1-13

Ursell, F., Dean, R. G., Yu, Y. S., 1960. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment. *Journal of Fluid Mechanics*, 7, (01), pp.33-52.

